

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΠΕΔΙΟ HEAT PIPE ΣΕ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΕΣ

ΚΑΙ ΜΟΝΙΜΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

υπό

ΜΑΚΡΙΔΗ ΣΤΥΛΙΑΝΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΔΡ. ΕΡΡΙΚΟΣ ΣΤΑΠΟΥΝΤΖΗΣ

Τεχνική Υποστήριξη: ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΔΑΦΕΡΕΡΑΣ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2017

© 2017 Μακρίδης Στυλιανός

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής

(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Αναστάσιος Σταματέλλος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρωτίστως οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Ερρίκο Σταπουντζή, για την τιμή που μου έκανε αποδεχόμενος την επίβλεψη της παρούσης, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθώς και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητές κκ. Αναστάσιο Σταματέλλο και Νικόλαο Πελεκάση για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Επιπλέον ευχαριστώ θερμά τον ηλεκτρονικό κ. Αναστάσιο Δαφερέρα, η συμβολή του οποίου υπήρξε σπουδαία, σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης εργασίας. Επιπροσθέτως οφείλω να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου Αλέξανδρο Εκίζογλου και Πάρη Φλέγκα για την πολύτιμη βοήθειά τους, κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων. Επιπλέον νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Σοφία χωρίς της οποίας την κατανόηση, ολόψυχη στήριξη και επίμονη παρότρυνση, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου, θα ήταν αδύνατο να ολοκληρωθεί η διπλωματική μου εργασία. Τέλος οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς της συζύγου μου Νικόλαο και Μαρία για τη γενικότερη προσφορά τους και στήριξη. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Ιωάννη και Ευαγγελία για την αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στον υιό μου Ιωάννη.

Στέλιος Μακρίδης

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αναλυτική μελέτη του θερμοκρασιακού πεδίου κατά μήκος ενός αγωγού θερμότητας (Heat Pipe) το οποίο βρίσκει εφαρμογή ως σύστημα απαγωγής θερμότητας από διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και κυρίως από τους επεξεργαστές των φορητών Η/Υ. Τα πειράματα διεξήχθησαν τόσο σε μεταβατικές όσο και σε μόνιμες συνθήκες λειτουργίας του heat pipe. Στο τμήμα του εξαερωτήρα τοποθετήθηκε πυρήνας χαλκού κυλινδρικής γεωμετρίας, για την ενθυλάκωση της μύτης ενός soldering iron προκειμένου να προσομοιωθεί το θερμικό φορτίο του επεξεργαστή. Στο τμήμα του συμπυκνωτή του αγωγού, υπήρχαν τοποθετημένα πτερύγια ψήκτρας για την απαγωγή της θερμότητας, μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής, με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα. Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε θερμική κάμερα και το αντίστοιχο λογισμικό επεξεργασίας εικόνας και βίντεο της εταιρείας FLIR, με σκοπό την οπτική απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου κατά μήκος του αδιαβατικού τμήματος του αγωγού. Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα, κατά την έξοδο του από τα πτερύγια ψύξης, τόσο με τη βοήθεια κοινού ανεμόμετρου όσο και με τη μεθοδολογία hot wire. Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας του αέρα με τη βοήθεια ανεμόμετρου/θερμομέτρου της Velocicalc, όπως επίσης και μετρήσεις θερμοκρασίας στον πυρήνα από χαλκό, με τη βοήθεια ενός θερμοστοιχείου και κατάλληλης διάταξης. Όλα τα πειράματα διεξήχθησαν για σταθερή ισχύ εισόδου στο σύστημα, ενώ ως παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα.

Abstract

In this thesis there is a meticulous study of the temperature field across a heat pipe which is used to cool down a wide variety of electronic parts or, in this particular case, a laptop processor. The experiments have been conducted under constant as well as transitional conditions. At the evaporator segment, a cylindrical piece of copper was adopted to encapsulate the tip a soldering iron, in order to simulate the heat input of a laptop processor. At the condenser segment a fan coil was installed as a heat sink and a fan was used to dissipate the heat. During the experiments an infrared camera was used along with the compatible FLIR software. Moreover, measurements of air temperature and velocity were taken at the condenser segment of the heat pipe using the Velocicalc anemometer/thermometer as well as the hot wire method. In addition temperature measurements at the evaporator segment were conducted, using a thermocouple combined with a proper transmitter and a commutator accordingly. All the experiments were conducted under constant heat input, while the fan input voltage was used as a parameter.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	14
2.1 Αρχές Θερμοδυναμικής	14
2.2 Μετάδοση θερμότητας	17
2.2.1 Αγωγή θερμότητας.....	17
2.2.2 Συναγωγή	18
2.2.3 Ακτινοβολία.....	19
2.3 Αρχή λειτουργίας των heat pipes.....	19
2.4 Περιορισμοί και όρια λειτουργίας,	22
2.5 Ανασκόπηση κυρίων ερευνών.....	24
2.6 Θερμική ακτινοβολία.....	26
2.7 Αρχή λειτουργίας της θερμικής κάμερας.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	32
3.1 Μετρήσεις ταχύτητας του αέρα.....	32
3.1.1 Μέτρηση μέσων τιμών	33
3.1.2 Μέτρηση στιγμιαίων τιμών	34
3.2 Μετρήσεις θερμοκρασίας του αέρα.....	37
3.3 Μετρήσεις θερμοκρασίας στον πυρήνα.....	38
3.4 Μετρήσεις θερμοκρασίας με χρήση θερμόμετρου IR χειρός,	40

3.5	Μεθοδολογία image processing	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ		51
4.1	Σχεδιασμός της συσκευής προσομοίωσης.....	51
4.2	Κατασκευή της συσκευής προσομοίωσης.....	52
4.3	Όργανα μετρήσεων	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ		63
5.1	Θερμοκρασίες στον πυρήνα	63
5.2	Μετρήσεις ταχύτητας αέρα.....	70
5.3	Μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα.....	73
5.4	Υπολογισμός ισχύος εισόδου-εξόδου στη συσκευή	75
5.5	Μετρήσεις θερμοκρασιών με θερμόμετρο IR χειρός	79
5.6	Πλήρης απεικόνιση θερμοκρασιακού πεδίου	83
5.6.1	Ανάλυση με βάση τη κεντρική γραμμή.....	83
5.6.2	Ανάλυση με βάση τις περιοχές.....	95
5.6.3	Ανάλυση με βάση τα σημεία.....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ		101
6.1	Συμπεράσματα	101
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		104

Πίνακας συμβόλων

Θ : Θερμοκρασία [$^{\circ}\text{C}$]

u : Ταχύτητα [m/s]

Q : Ροή θερμότητας [W]

A : Εμβαδό επιφάνειας [m^2]

k : Συντελεστής αγωγιμότητας $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}} \right]$

ρ : Πυκνότητα $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

T_{sat} : Θερμοκρασία κορεσμού [$^{\circ}\text{C}$]

P_{sat} : Πίεση κορεσμού [atm]

C_p : Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{K}} \right]$

μ : Δυναμικό ιξώδες [Poise]

ν : Κινηματικό ιξώδες [Stoke]

h : Συντελεστής συναγωγής $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2^{\circ}\text{K}} \right]$

σ : Επιφανειακή τάση $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$

c: Ταχύτητα του φωτός στο κενό [m/s]

ε: Ικανότητα εκπομπής επιφάνειας [-]

x: Απόσταση [m]

q: Ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

T_s : Θερμοκρασία επιφάνειας στερεού κατά τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή [$^{\circ}\text{C}$]

T_{∞} : Θερμοκρασία μακριά από την επιφάνεια [$^{\circ}\text{C}$]

ΔP : Διαφορά πίεσης [atm]

L_{eff} : Δραστικό μήκος του heat pipe [m]

A_w : Επιφάνεια του φυτίλιού σε τομή κάθετα στο διαμήκη άξονα του heat pipe [m^2]

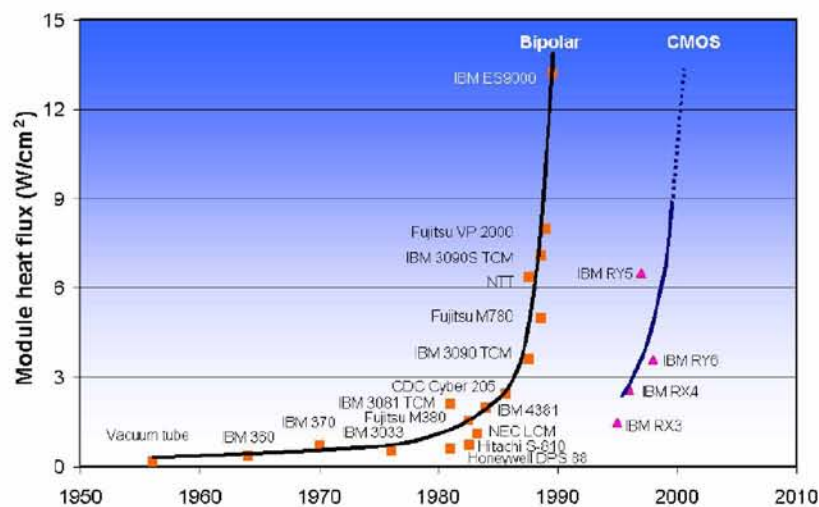
WHL: Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$

g: Επιτάχυνση της βαρύτητας $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έχουν μπει για τα καλά στη καθημερινή μας ζωή, βρίσκοντας εφαρμογή από παιδικά παιχνίδια, έξυπνα τηλέφωνα, φορητούς ή οικιακούς Η/Υ μέχρι και Η/Υ μεγάλης ισχύος. Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα προκειμένου να επιτελέσουν τη λειτουργία για την οποία έχουν σχεδιαστεί, διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα και αποτελούν υποψήφιες περιοχές συσσώρευσης θερμότητας, καθώς η διαρροή μιας αντίστασης από ηλεκτρικό ρεύμα, συνοδεύεται από παραγωγή θερμότητας.

Η επικρατούσα τάση της αγοράς των ηλεκτρονικών συσκευών είναι εκθετικά αυξητική σε σχέση με την υπολογιστική ισχύ τους, καθώς υπάρχει ζήτηση για όλο και περισσότερες, πιο απαιτητικές και πιο γρήγορες εφαρμογές, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει ζήτηση για ολοένα και μικρότερα μεγέθη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση της θερμότητας που παράγεται ανά μονάδα όγκου, όπως διακρίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 1.1 Χρονολογική εξέλιξη της θερμορροής των επεξεργαστών.

Αυτές ακριβώς οι ροές θερμότητας πρέπει να απομακρύνονται επαρκώς, διαφορετικά τυχούσα συσσώρευσή τους θα οδηγούσε σε αύξηση των θερμοκρασιών - ενδεχομένως και εκτός ορίων λειτουργίας - με καταστρεπτικές συνέπειες, τόσο για τα επηρεαζόμενα εξαρτήματα, όσο και για ολόκληρη τη συσκευή. Καθίσταται επομένως επιτακτική η ανάγκη ενός συστήματος απαγωγής της θερμότητας, ώστε η θερμοκρασία να διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα.

Αυτή ακριβώς την ανάγκη καλύπτει η χρήση των heat pipes, η οποία έφερε επανάσταση στον έλεγχο της θερμοκρασίας των ηλεκτρονικών συσκευών και ιδιαίτερα των επεξεργαστών των laptops από τα μέσα της δεκαετίας του '90 και εφεξής, αφού πρόκειται για τελείως παθητικό σύστημα απαγωγής θερμότητας, με θερμικές αγωγιμότητες τις οποίες δε φέρει κανένα συμπαγές υλικό και ικανότητα να μεταφέρει θερμότητα με ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στα δυο άκρα του. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα όμως των αγωγών θερμότητας είναι ότι δεν καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο, σε σχέση με άλλες πιο παραδοσιακές μεθόδους ψύξης ηλεκτρονικών, γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς σε εφαρμογές όπως τα lap tops και τα notebooks, όπου ο διαθέσιμος χώρος για το σύστημα ψύξης, είναι εξαιρετικά περιορισμένος (βλ. σχήματα 1.2 & 1.3).

Η συνεισφορά της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι ότι μελετά το θερμοκρασιακό πεδίο, κατά μήκος ενός heat pipe, τόσο σε μεταβατικές, όσο και σε μόνιμες συνθήκες λειτουργίας ώστε να βρεθεί το ποσό της ενέργειας ανά μονάδα χρόνου (ισχύς) που εξέρχεται από τη συσκευή με τη βοήθεια του heat pipe καθώς επίσης και το ποσοστό αυτής σε σχέση με την ισχύ εισόδου στο σύστημα. Επιπλέον έγινε προσπάθεια εντοπισμού των θερμοκρασιακά επικίνδυνα περιοχών και να αναζητηθούν κατάλληλοι τρόποι αντιμετώπισης.

heat pipe



Σχήμα 1.2 Εσωτερικό ενός Laptop

heat pipe



Σχήμα 1.3 Εσωτερικό ενός Notebook

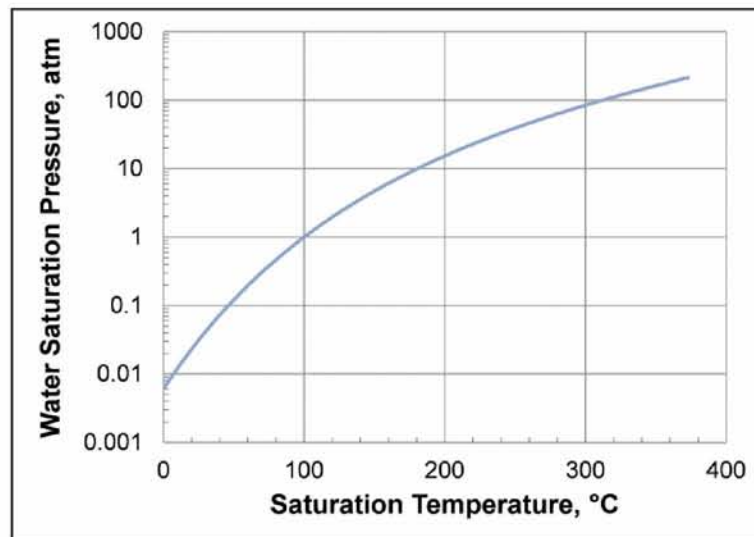
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά γίνεται παρουσίαση των θεμελιωδών αρχών της θερμοδυναμικής και της μετάδοσης της θερμότητας, ακολουθεί η περιγραφή της αρχής λειτουργίας των αγωγών θερμότητας και των περιορισμών κατά τη λειτουργία τους, στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κύριων ερευνών. Τέλος γίνεται αναφορά στη θερμική ακτινοβολία και παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της θερμικής κάμερας όπως και ο τρόπος χρήσης της.

2.1 Αρχές Θερμοδυναμικής

Η φράση "το νερό βράζει στους 100°C" είναι ημιτελής, η σωστή φράση είναι "το νερό βράζει στους 100°C, όταν βρίσκεται σε πίεση 1 atm". Η θερμοκρασία στην οποία βράζει μια καθαρή ουσία, εξαρτάται από την πίεση. Έτσι, για δεδομένη πίεση, ονομάζουμε θερμοκρασία κορεσμού T_{sat} τη θερμοκρασία στην οποία ξεκινάει ο βρασμός. Παρομοίως, για δεδομένη θερμοκρασία, ονομάζουμε πίεση κορεσμού P_{sat} την πίεση στην οποία ξεκινάει ο βρασμός.

Για όλες σχεδόν τις ουσίες, υπάρχουν πίνακες κορεσμού που περιέχουν τις τιμές της πίεσης κορεσμού σε διάφορες θερμοκρασίες ή/και των θερμοκρασιών κορεσμού σε διάφορες πιέσεις. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μας ενδιαφέρει το νερό ως εργαζόμενο μέσο, οπότε τοποθετώντας σε ένα διάγραμμα τις T_{sat} και P_{sat} του νερού, προκύπτει η καμπύλη κορεσμού αερίου-υγρού για το νερό, που φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

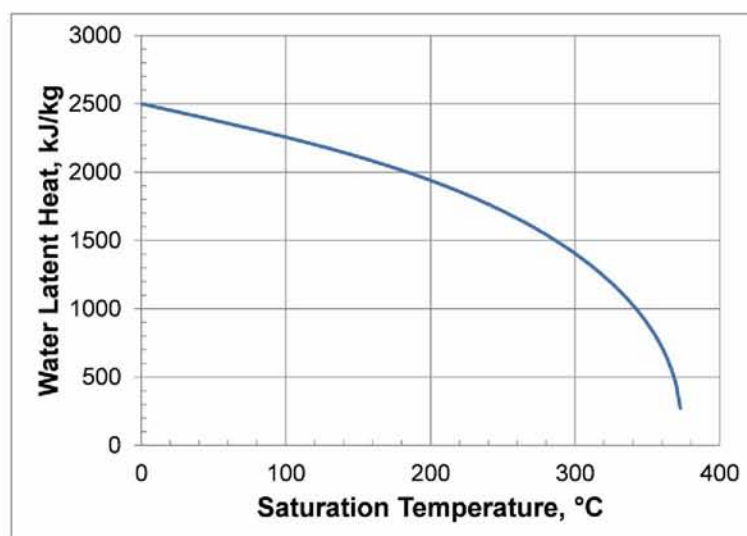


Σχήμα 2.1 Καμπύλη κορεσμού αερίου-υγρού νερού.

Με βάση τα παραπάνω για να εξατμιστεί ένα υγρό ή για να λιώσει ένα στερεό απαιτείται σημαντική ποσότητα ενέργειας. Το ποσό αυτής ακριβώς της ενέργειας για την αλλαγή φάσης ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα. Πιο συγκεκριμένα το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την τήξη ενός στερεού ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα τήξης και ισούται με το ποσό της ενέργειας που αποβάλλεται κατά την πήξη της ίδιας ουσίας. Ομοίως το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την εξάτμιση μιας ουσίας ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης και ισούται με το ποσό της ενέργειας που αποβάλλεται κατά τη συμπύκνωση της ίδιας ουσίας. Η λανθάνουσα θερμότητα είναι συνάρτηση της πίεσης ή της θερμοκρασίας κατά την οποία λαμβάνει χώρα η αλλαγή της φάσης. Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει το νερό ως εργαζόμενο μέσο, οπότε τοποθετώντας σε ένα διάγραμμα τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε σχέση με τη T_{sat} του νερού, προκύπτει η καμπύλη του σχήματος 2.2.

Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα του σχήματος 2.2, η περιοχή ενδιαφέροντος μας είναι χονδρικά από 0 °C έως 100 °C, στο οποίο διάστημα θεωρούμε γραμμική τη μεταβολή της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης του νερού (WLH) σε σχέση με τη T_{sat} , χωρίς να εισάγουμε σφάλμα μεγαλύτερο του 2%. Η συνάρτηση αυτή είναι:

$$WLH = -2,429 T_{sat} + 2500 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (2-1)$$



Σχήμα 2.2 Λανθάνουσα θερμότητα του νερού με τη θερμοκρασία T_{sat}

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι ιδιότητες του ατμού νερού συναρτήσει της T_{sat} .

Absolute Pressure	Boiling Point	Specific Volume (steam)	Density (steam)	Latent heat of Vaporization		Specific Heat
				(kJ/kg)	(kcal/kg)	
(bar)	(C)	(m ³ /kg)	(kg/m ³)			(kJ/kg K)
0.02	17.51	67.006	0.015	2460.19	587.61	18.644
0.03	24.10	45.667	0.022	2444.65	583.89	18.694
0.04	28.98	34.802	0.029	2433.10	581.14	18.736
0.05	32.90	28.194	0.035	2423.82	578.92	18.774
0.06	36.18	23.741	0.042	2416.01	577.05	18.808
0.07	39.02	20.531	0.049	2409.24	575.44	18.840
0.08	41.53	18.105	0.055	2403.25	574.01	18.871
0.09	43.79	16.204	0.062	2397.85	572.72	18.899
0.1	45.83	14.675	0.068	2392.94	571.54	18.927
0.2	60.09	7.650	0.131	2358.40	563.30	19.156
0.3	69.13	5.229	0.191	2336.13	557.97	19.343
0.4	75.89	3.993	0.250	2319.23	553.94	19.506
0.5	81.35	3.240	0.309	2305.42	550.64	19.654
0.6	85.95	2.732	0.366	2293.64	547.83	19.790
0.7	89.96	2.365	0.423	2283.30	545.36	19.919
0.8	93.51	2.087	0.479	2274.05	543.15	20.040
0.9	96.71	1.869	0.535	2265.65	541.14	20.156
1 ¹⁾	99.63	1.694	0.590	2257.92	539.30	20.267

Πίνακας 2.1 Ιδιότητες κορεσμένου ατμού νερού.

2.2 Μετάδοση θερμότητας

Η θερμότητα μεταδίδεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους: με **αγωγή**, με **συναγωγή** και με **ακτινοβολία**. Η θερμότητα μεταδίδεται πάντοτε παράλληλα στην κλίση του θερμοκρασιακού πεδίου, επομένως και οι τρεις αυτοί τρόποι προϋποθέτουν την ύπαρξη θερμοκρασιακών διαφορών και μάλιστα με κατεύθυνση από την περιοχή υψηλής προς την περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας.

2.2.1 Αγωγή θερμότητας

Αγωγή θερμότητας ονομάζεται η μεταφορά ενέργειας από τα περισσότερα ενεργά σωματίδια μιας ουσίας προς τα γειτονικά, λιγότερο ενεργά, ως αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων. Η αγωγή θερμότητας στα στερεά υλικά οφείλεται στο συνδυασμό των ταλαντώσεων των μορίων σε μια δομή πλέγματος και της μεταφοράς ενέργειας από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Στα υγρά και στα αέρια η αγωγή της θερμότητας οφείλεται στις συγκρούσεις και στη διάχυση μεταξύ των μορίων κατά την τυχαία τους κίνηση.

Ο **Fourier** διατύπωσε την εξίσωση που περιγράφει την αγωγή της θερμότητας ακολούθως:

$$q = -k \nabla T \quad (2-2)$$

όπου **q** είναι η ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφανείας (θερμοροή), **k** είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Η χρήση ενός μονόμετρου μεγέθους **k** φανερώνει ότι δεν υπάρχει προτιμώμενη κατεύθυνση για τη θερμική αγωγή, δηλαδή η θερμική ροή είναι παράλληλη με τη διαφορά θερμοκρασίας. Τα υλικά για τα οποία ισχύει κάτι τέτοιο ονομάζονται ισότροπα. Σε διαφορετική περίπτωση όπως πχ στα σύνθετα ινώδη υλικά ή στο ξύλο, η θερμική αγωγιμότητα παίρνει τη μορφή ενός τένσορα. Στην ειδική περίπτωση όπου έχουμε

μονοδιάστατη θερμική αγωγή κατά τη x κατεύθυνση, κάθετα στην επιφάνεια A, η ροή θερμότητας παίρνει τη μορφή:

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2-3)$$

2.2.2 Συναγωγή

Συναγωγή είναι ο τρόπος μεταφοράς ενέργειας μεταξύ της επιφάνειας ενός στερεού και του γειτονικού σε αυτή υγρού ή αερίου, το οποίο βρίσκεται σε κίνηση, και συνδυάζει τη θερμική αγωγή και την κίνηση του ρευστού. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ρευστού, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής. Κατά την οριακή περίπτωση όπου η ταχύτητα του ρευστού μηδενίζεται, η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα μέσω αμιγούς αγωγής.

Η συναγωγή αποκαλείται εξαναγκασμένη συναγωγή, εάν το ρευστό υποχρεώνεται να ρέει πάνω από μια επιφάνεια με τη βοήθεια κάποιας εξωτερικής διάταξης πχ ενός ανεμιστήρα ή μιας αντλίας. Στον αντίποδα υπάρχει η ελεύθερη συναγωγή όπου η κίνηση του ρευστού οφείλεται αποκλειστικά στις δυνάμεις που ασκούνται στο ρευστό σαν συνέπεια της διαφοράς στην πυκνότητά του, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας \dot{Q}_{conv} καθορίζεται από το νόμο ψύξης του Newton που ακολουθεί:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2-4)$$

Όπου h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας και T_∞ η θερμοκρασία μακριά από την επιφάνεια. Υπενθυμίζεται ότι ο h δεν αποτελεί ιδιότητα του ρευστού, αλλά παράμετρο προσδιοριζόμενη θεωρητικά και πειραματικά, καθώς εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας, τη φύση της κίνησης του ρευστού, τις ιδιότητες του ρευστού και την ταχύτητα της κυρίας μάζας.

2.2.3 Ακτινοβολία

Ακτινοβολία ονομάζεται η ενέργεια που εκπέμπει η ύλη με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (φωτόνια) , εξαιτίας διαφόρων μεταβολών στην ηλεκτρονική διαμόρφωση των ατόμων ή των μορίων. Η ακτινοβολία δεν προϋποθέτει την ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου, καθώς μπορούμε να έχουμε ακτινοβολία δια μέσου του απόλυτου κενού, σε αντιδιαστολή με την αγωγή και τη συναγωγή. Η ακτινοβολία είναι γρήγορος τρόπος μεταφοράς θερμότητας, και χωρίς απώλειες στο κενό. Κάθε σώμα σε μια θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Παρότι η ακτινοβολία είναι ένα ογκομετρικό φαινόμενο, συνήθως θεωρείται επιφανειακό φαινόμενο, για στερεά τα οποία είναι αδιαφανή στη θερμική ακτινοβολία, όπως είναι πχ τα μέταλλά, το ξύλο και τα πετρώματα. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια πραγματική επιφάνεια γράφεται ως:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_s \quad (2-5)$$

όπου ε είναι η ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας, σ η σταθερά Boltzman. Για μια επιφάνεια μικρού σχετικά εμβαδού A , η οποία περιβάλλεται σε θερμοκρασία T_{surr} , ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας καθορίζεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad (2-6)$$

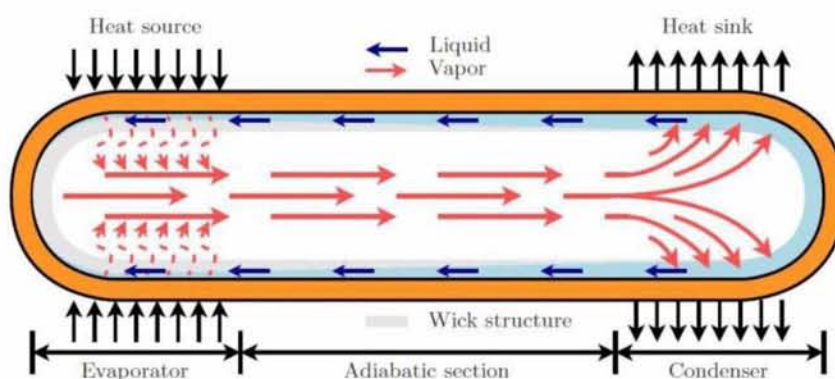
2.3 Αρχή λειτουργίας των heat pipes

Τα heat pipes είναι συσκευές, χωρίς κινητά μέρη, με ικανότητα να μεταφέρουν τη θερμότητα σε μεγάλες αποστάσεις και μικρές θερμοκρασιακές κλίσεις. Πρόκειται για διατάξεις τελείως παθητικές, αφού δεν απαιτείται κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία τους. Το heat pipe είναι κατά βάση ένας σφραγισμένος λεπτός σωλήνας, που εσωτερικά φέρει επένδυση από φυτίλι (wick), καθώς και μικρή ποσότητα από κάποιο εργαζόμενο μέσο, όπως

για παράδειγμα νερό σε κορεσμένη κατάσταση. Η επιλογή του κατάλληλου ρευστού εξαρτάται κυρίως από την επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας.

Το αριστερό άκρο (βλ. σχήμα 2.3) το ονομάζουμε **εξαερωτήρα** (evaporator) και είναι το τμήμα του αγωγού το οποίο βρίσκεται προσκολλημένο στο θερμό εξάρτημα το οποίο επιθυμούμε να ψύξουμε. Η θερμότητα εισέρχεται στον αγωγό και μικρή ποσότητα του μέσου εξατμίζεται, αυξάνοντας λίγο την πίεση τοπικά.

Στη συνέχεια η αέρια φάση κινείται προς το άλλο άκρο, το **συμπυκνωτή** (condenser), ο οποίος βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τον εξαερωτήρα. Εκεί η αέρια φάση αποβάλλει τη θερμότητα που είχε παραλάβει νωρίτερα και μεταπίπτει στην υγρή φάση. Ο συμπυκνωτής βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τον εξαερωτήρα διότι βρίσκεται προσκολλημένος στα πτερύγια ψύξης, τα οποία μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής (πχ με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα), άγουν τη θερμότητα που αποβλήθηκε από τη μετάπτωση της αέριας φάσης σε υγρή, εκτός του heat pipe.

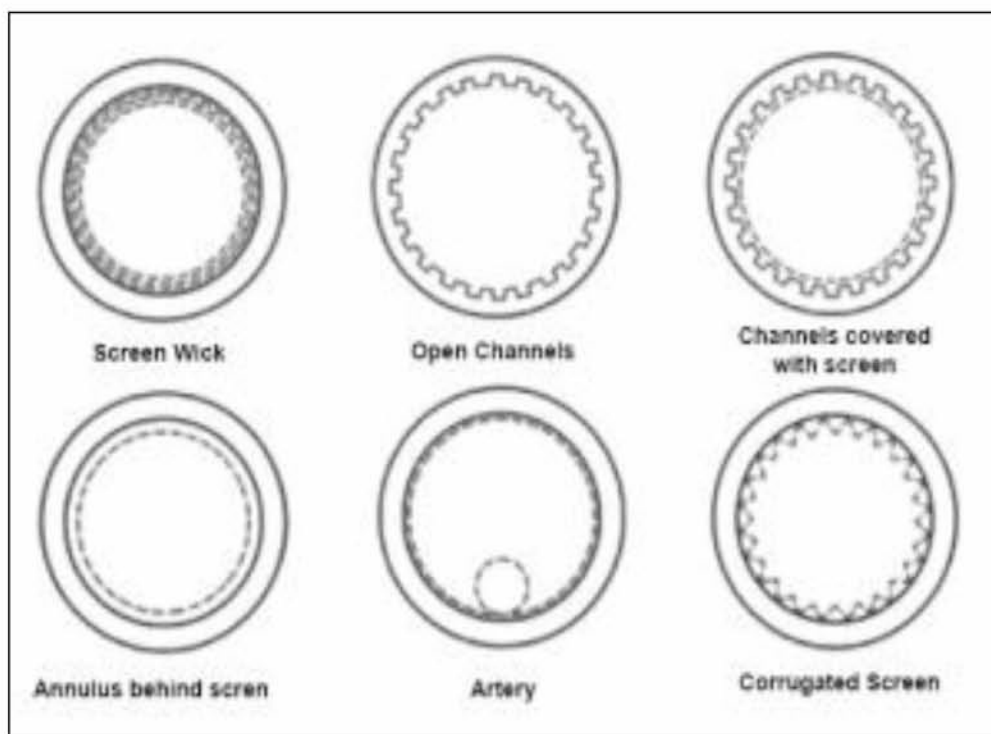


Σχήμα 2.3 Αρχή λειτουργίας του heat pipe

Τέλος η υγρή φάση στο τμήμα του συμπυκνωτή απορροφάται από το φυτίλι και κινείται περιφερειακά κατά μήκος του κεντρικού τμήματος προς τον εξαερωτήρα κάτω από την επίδραση των τριχοειδών δυνάμεων, ολοκληρώνοντας τον κύκλο. Στο κεντρικό αυτό τμήμα του αγωγού, έχουμε δυο αντίθετα κινούμενες φάσεις του ρευστού, χωρίς σημαντική

ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ τους, ή με το περιβάλλον, για αυτό και ονομάζεται **αδιαβατικό** τμήμα.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εσωτερική δομή των heat pipes και πιο συγκεκριμένα η δομή του φυτιλιού (wick structure). Πρωταρχικός σκοπός του φυτιλιού είναι να δημιουργεί την τριχοειδή πίεση που απαιτείται, ώστε να έχουμε κίνηση της υγρής φάσης από το συμπυκνωτή προς τον εξαερωτήρα. Συνήθως αποτελείται από πορώδη υλικά όπως ατσάλι, χαλκό, αλουμίνιο ή νικέλιο και σε διάφορες τιμές διαμέτρου των πόρων. Επιπλέον, είναι απαραίτητο το φυτίλι να διανέμει ομοιόμορφα την υγρή φάση στο τμήμα του εξαερωτήρα, έτσι ώστε να μπορεί να παραλαμβάνει τη θερμότητα η υγρή φάση. Στο σχήμα 2.4 που ακολουθεί, φαίνονται διάφορα heat pipes σε τομή κατά τον διαμήκη άξονα καθώς και η δομή του φυτιλιού.



Σχήμα 2.4 Heat pipe wick structure

2.4 Περιορισμοί και όρια λειτουργίας.

Προκειμένου να λειτουργήσει ένα heat pipe, θα πρέπει η μέγιστη αναπτυσσόμενη τριχοειδής πίεση στο φυτίλι ΔP_c να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα όλων των πτώσεων πίεσης, έτσι ώστε η υγρή φάση να επιστρέφει στον εξαερωτήρα. Δηλαδή θα πρέπει να ισχύει:

$$\Delta P_c \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g \quad (2-7)$$

όπου ΔP_l η πτώση πίεσης κατά την κίνηση του υγρού από το συμπυκνωτή στον εξαερωτήρα
όπου ΔP_v η πτώση πίεσης κατά την κίνηση της αέριας φάσης από τον εξαερωτήρα στο συμπυκνωτή.

όπου ΔP_g η διαφορά πίεσης λόγω βαρύτητας, μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή και μηδέν ανάλογα με τον προσανατολισμό του αγωγού.

Η πτώση πίεσης του υγρού ΔP_l , μπορεί να υπολογιστεί από την εμπειρική σχέση:

$$\Delta P_l = \frac{\mu_l \cdot L_{\text{eff}} \cdot Q}{\rho_l \cdot K \cdot A_w \cdot h_{fg}} \quad (2-8)$$

όπου μ_l το ιξώδες του υγρού, L_{eff} το δραστικό μήκος του heat pipe, ρ_l η πυκνότητα του υγρού, K η διαπερατότητα του φυτिलιού, A_w η επιφάνεια του φυτिलιού σε μια διατομή και h_{fg} η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του μέσου. Η πτώση πίεσης της αέριας φάσης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\Delta P_v = \frac{16\mu_v \cdot L_{\text{eff}} \cdot Q}{2 \left(\frac{D_v}{2} \right)^2 \cdot A_v \cdot \rho_v \cdot h_{fg}} \quad (2-9)$$

όπου μ_v το ιξώδες της αέριας φάσης, ρ_v η πυκνότητα της αέριας φάσης, D_v η απόσταση που διανύει η αέρια φάση και A_v η επιφάνεια που καλύπτει η αέρια φάση σε μια διατομή. Η

μέγιστη τριχοειδής πίεση $\Delta P_{C,max}$ που αναπτύσσεται μέσα στο φυτίλι, υπολογίζεται από την εξίσωση Laplace-Young [10]:

$$\Delta P_{C,max} = \frac{2\sigma_1}{r_{eff}} \quad (2-10)$$

όπου σ_1 η επιφανειακή τάση και r_{eff} η δραστική ακτίνα των πόρων στο φυτίλι.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας από ένα heat pipe μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$Q_{max} = \left(\frac{\rho_1 \sigma_1 h_{fg}}{\mu_1} \right) \left(\frac{KA_w}{L_{eff}} \right) \left(\frac{2}{r_{eff}} - \frac{\rho_1 g L_{eff} \sin \varphi}{\sigma_1} \right) \quad (2-11)$$

όπου φ η γωνία που σχηματίζει ο άξονας του αγωγού με την οριζόντιο, και λαμβάνει θετική τιμή όταν ο εξαερωτήρας βρίσκεται πάνω από το συμπυκνωτή. Κατά την ειδική περίπτωση όπου ο αγωγός βρίσκεται σε οριζόντια θέση ($\varphi=0$), η παραπάνω σχέση λαμβάνει τη μορφή:

$$Q_{max} = \left(\frac{\rho_1 \sigma_1 h_{fg}}{\mu_1} \right) \left(\frac{KA_w}{L_{eff}} \right) \left(\frac{2}{r_{eff}} \right) \quad (2-12)$$

Επιπλέον θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν το όριο βρασμού, αυτό συμβαίνει όταν η ροή θερμότητας που εισέρχεται στον αγωγό είναι ικανή ώστε να βράσει όλο το υγρό στο φυτίλι, οπότε στεγνώνει το φυτίλι και ο αγωγός παύει να λειτουργεί. Η μέγιστη ροή θερμότητας που μπορεί να παραλάβει ένας αγωγός προτού βράσει όλο το υγρό στο φυτίλι είναι (Peterson 1994):

$$q_{b,e} = \left(\frac{2\pi L_e K_{eff} T_v}{\lambda \rho_v \ln(r_i/r_v)} \right) \left(\frac{2\sigma}{r_n} - \Delta P_{c,m} \right) \quad (2-13)$$

όπου $\Delta P_{c,m}$ η μέγιστη διαφορά πίεσης.

σ η επιφανειακή τάση

r_n η τραχύτητα του φυτιλιού (από $2,54 \times 10^{-5}$ m έως $2,54 \times 10^{-7}$ m)

T_v η θερμοκρασία της αέριας φάσης
 L_e το μήκος του εξαερωτήρα
 r_v η ακτίνα του χώρου κίνησης της αέριας φάσης
 r_i η εσωτερική ακτίνα του αγωγού
 ρ_v η πυκνότητα της αέριας φάσης
 λ η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης
 K_{eff} η ισοδύναμη αγωγιμότητα

Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται όταν έχουμε εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες της αέριας φάσης εσωτερικά του αγωγού. Σε αυτήν τη περίπτωση μικρές σταγόνες της υγρής φάσης παρασύρονται από την αέρια φάση και καταλήγουν στο συμπυκνωτή.

2.5 Ανασκόπηση κυρίων ερευνών

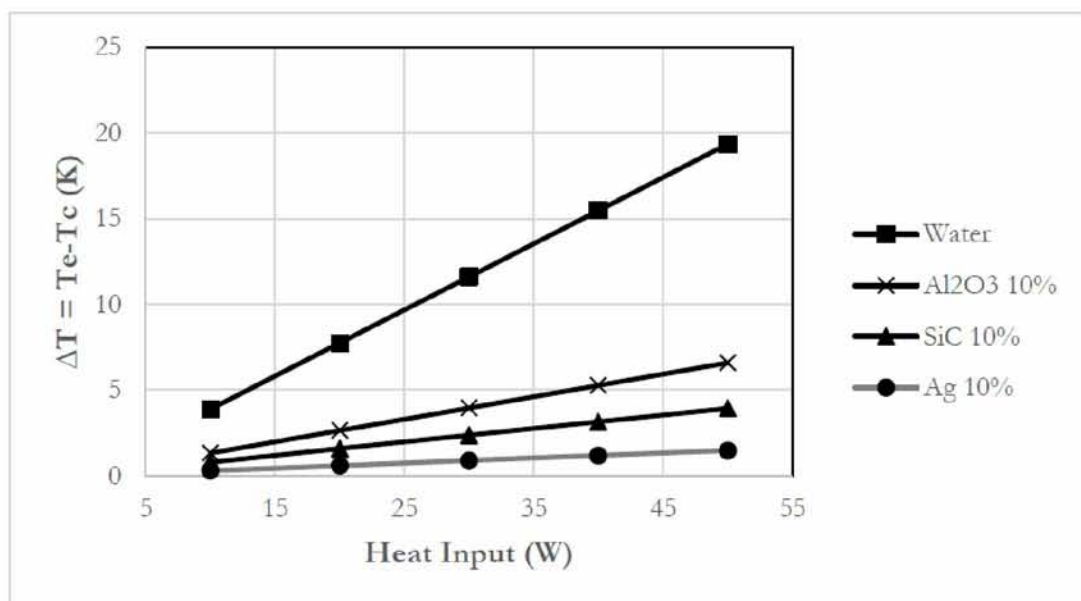
Ο R.S.Gaugler (1944), εργαζόμενος στην εταιρεία General Motors, ήταν ο πρώτος που συνέλαβε την ιδέα για μεταφορά θερμότητας εκμεταλλευόμενος τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (U.S. PATEND No 2350348) , εσωτερικά ενός αγωγού επενδυμένου με φυτίλι. Η ιδέα επανήλθε στην επιφάνεια σε εργασία του L.Trefethen (1962) σχετικά με το Αμερικανικό διαστημικό πρόγραμμα και ξανά το 1963 σε εργασία του T.Wyatt για τον έλεγχο της θερμοκρασίας σε δορυφόρους, η οποία και κατοχυρώθηκε ως πατέντα (US PATEND No 3152774 A). Η ιδέα ωστόσο δεν είχε μεγάλη απήχηση μέχρι το 1964 οπότε ο Groover δημοσίευσε τα αποτελέσματα ανεξάρτητης μελέτης του στα εργαστήρια του Los Alamos Scientific Laboratories, όπου και για πρώτη φορά γίνεται χρήση του όρου "Heat Pipe".

Σε εργασία του ο A. Faghri το 1995 συμπέρανε ότι οι αγωγοί θερμότητας εμφανίζουν εξαιρετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα έως και 90 φορές μεγαλύτερη από το χαλκό με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Στην ίδια εργασία εξήχθη το συμπέρασμα ότι οι αγωγοί

θερμότητας εμφανίζουν ιδιότητες εξομάλυνσης της ισχύος (Power flattening) αφού βρέθηκε ότι κρατούσαν σταθερή τη θερμοροή που αποβάλλονταν από το συμπυκνωτή τη στιγμή που στον εξαερωτήρα εφαρμοζόταν χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοροή. Για αυτούς τους λόγους χαρακτηρίστηκαν ως αποτελεσματικός τρόπος μεταφοράς συγκεντρωμένης θερμότητας. Επιπλέον, η θερμοκρασία στο συμπυκνωτή ήταν σχεδόν σταθερή, όταν στον εξαερωτήρα εφαρμοζόταν χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοροή.

Σε εργασία του ο Peterson το 1994 συμπέρανε ότι οι αγωγοί θερμότητας εμφανίζουν εξαιρετικά μικρή θερμική αντίσταση και ότι προσφέρουν γεωμετρική ευελιξία κατά το σχεδιασμό, αφού μεγάλες θερμοροές εισόδου μπορούν να απομακρυνθούν με μικρές θερμοροές κατά την έξοδο, μέσω φυσικής η εξαναγκασμένης συναγωγής.

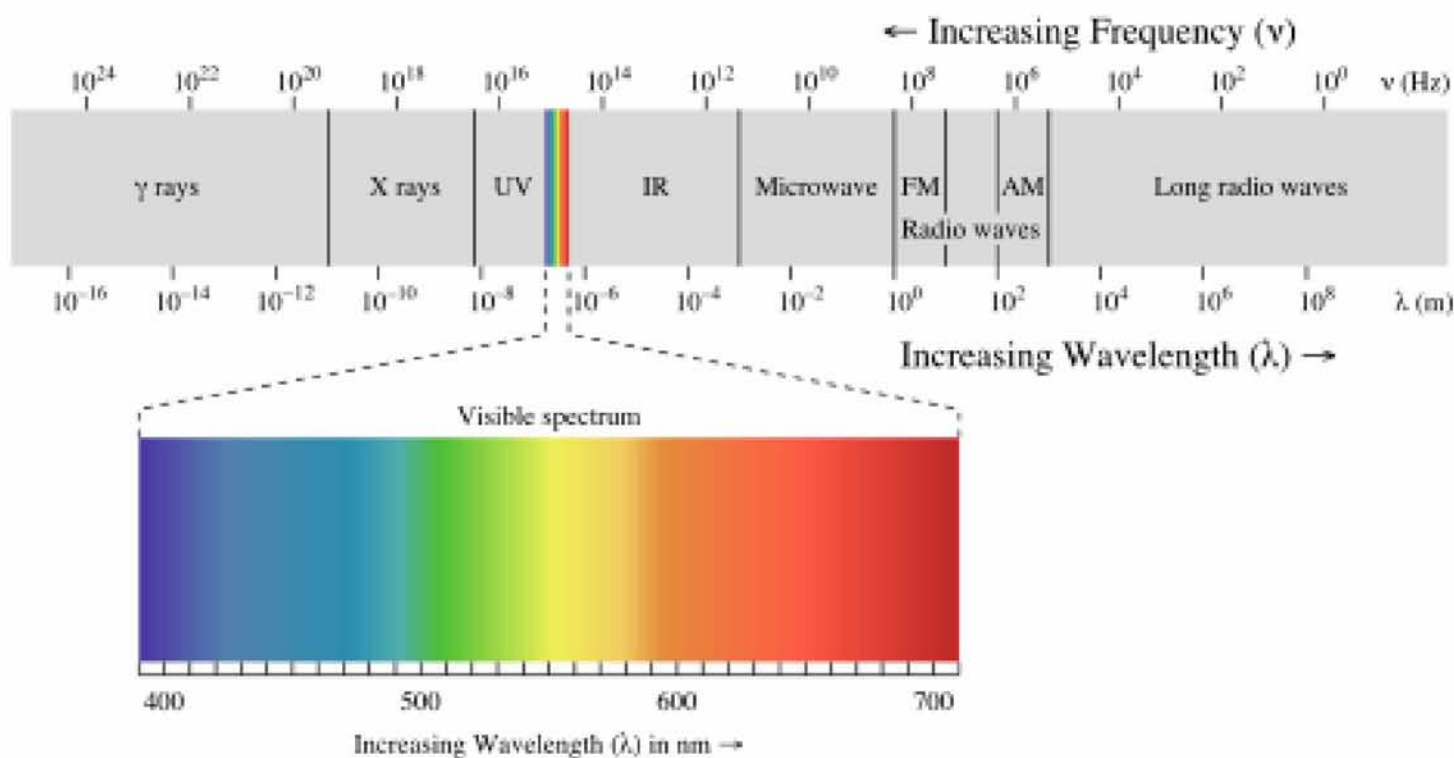
Οι Ferizah και Kassem (2014) διερευνώντας την επίδραση διαφόρων nanofluids στη θερμική αντίσταση των αγωγών θερμότητας, όταν αυτά χρησιμοποιούνται ως εργαζόμενα ρευστά, βρήκαν ότι όσο αυξάνονταν η θερμική αγωγιμότητα και η συγκέντρωση των μικροσωματιδίων, τόσο αυξανόταν και η θερμική αγωγιμότητα συνολικά του ρευστού με συνέπεια τη μείωση της θερμικής αντίστασης του αγωγού.



Σχήμα 2.5 Διαφορά θερμοκρασίας εξαερωτήρα-συμπυκνωτή για διάφορα nanofluids και μεταβλητή ισχύ εισόδου

2.6 Θερμική ακτινοβολία

Θερμική ακτινοβολία ονομάζεται η μετάδοση της θερμότητας μέσω των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος τους λ ή τη συχνότητά τους f , όπου $c = \lambda \cdot f$ με c την ταχύτητα του φωτός στο κενό, λ το μήκος κύματος και f τη συχνότητα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διαχωρίζεται τυχαία σε περιοχές μήκους κύματος που ονομάζονται μπάντες (bands) και διαχωρίζονται ανάλογα από τις μεθόδους παραγωγής και ανίχνευσης της ακτινοβολίας. Δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στην ακτινοβολία στις διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αφού όλες διέπονται από τους ίδιους νόμους. Μοναδική διαφορά μεταξύ τους αποτελεί το διαφορετικό μήκος κύματος.



Σχήμα 2.6 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Για τη θερμογραφία χρησιμοποιείται η υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος δηλαδή η περιοχή με μήκη κύματος από 0.1 έως 100 μm . Η ακτινοβολία όταν

πέσει πάνω σε ένα σώμα, το θερμαίνει και για αυτό λέγεται θερμική ακτινοβολία. Επιπλέον, επειδή η ακτινοβολία στην περιοχή μήκους κύματος από 0.38 έως 0.76 μm ερεθίζει το οπτικό νεύρο, μπορούμε να δούμε τη θερμική ακτινοβολία σε αυτή τη ζώνη σαν φως. Όλα τα σώματα σε θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός, εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία η οποία όταν πέσει πάνω σε ένα σώμα, ένα μέρος της απορροφάται, έστω α , ένα άλλο μέρος ανακλάται, έστω ρ και το υπόλοιπο μεταδίδεται μέσα στο σώμα, έστω τ . Ισχύει δηλαδή ότι

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2-14)$$

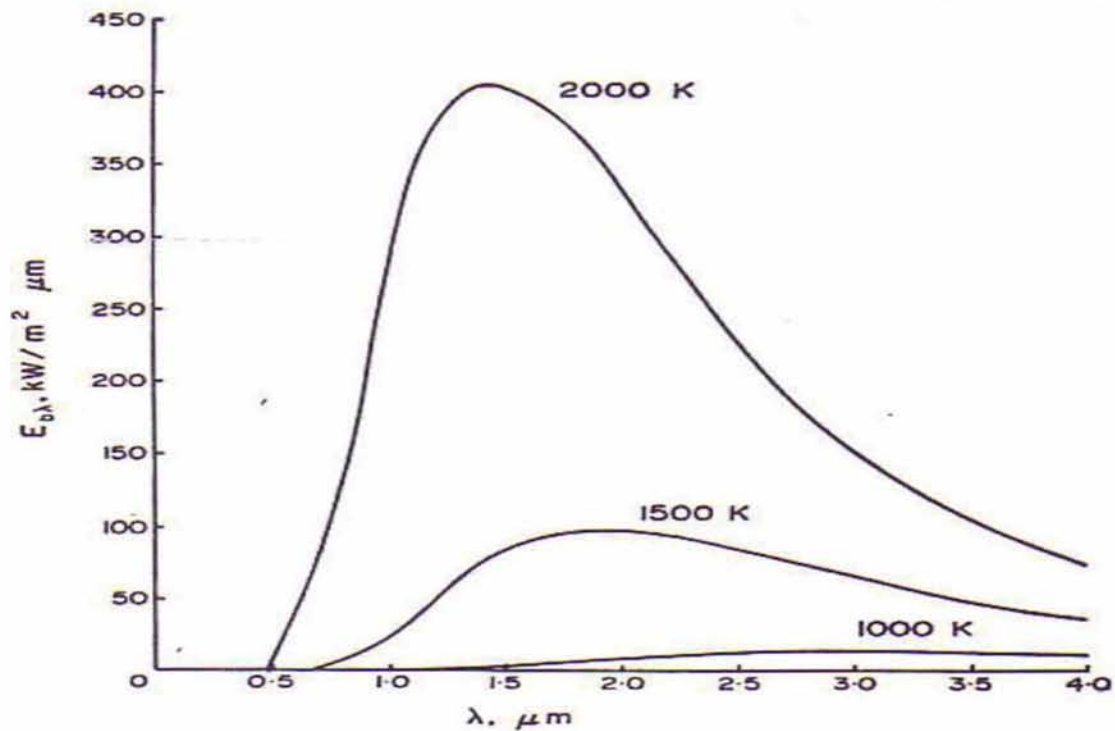
Τα περισσότερα στερεά υλικά απορροφούν πρακτικά όλη την ακτινοβολία σε ένα πολύ λεπτό εξωτερικό στρώμα τους, πάχους μικρότερου του 1 mm. Για αυτά τα υλικά ισχύει ότι:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2-15)$$

Μέλαν σώμα ονομάζεται το υλικό που εκπέμπει τη μέγιστη ποσότητα ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην απόλυτη θερμοκρασία του, ενώ ταυτόχρονα απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του. Ο ρυθμός με τον οποίο αποβάλλει ενέργεια μέσω ακτινοβολίας ένα μέλαν σώμα είναι ανάλογος της $4^{\text{ης}}$ δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του, δηλαδή:

$$E_{b\lambda} = \sigma \cdot T^4 \quad (2-16)$$

όπου $E_{b\lambda}$ η θερμορροή ανά μονάδα επιφάνειας, σ η σταθερά Boltzman και T η απόλυτη θερμοκρασία του. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η κατανομή της $E_{b\lambda}$ στο φάσμα της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος.



Σχήμα 2.7 Κατανομή Planck της ισχύος ακτινοβολίας για διάφορες θερμοκρασίες

Εάν η θερμοκρασία του σώματος δεν ξεπερνά τους 500°C, το ποσοστό της ακτινοβολίας που βρίσκεται στην ορατή περιοχή είναι πρακτικά αμελητέο. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες αρχίζει να ακτινοβολεί το σώμα στο σκοτάδι, στην αρχή σε σκοτεινό κόκκινο χρώμα (700°C), στη συνέχεια σε βυσσινί (900°C), μετά σε πορτοκαλί (1100°C), και τέλος σε λευκό (1400°C και άνω, όπου η εκπεμπόμενη ενέργεια καλύπτει όλο το ορατό φάσμα).

Ο συντελεστής εκπομπής μιας πραγματικής επιφάνειας, ορίζεται σαν το πηλίκο της εκπεμπόμενης θερμορροής προς αυτήν που θα εξέπεμπε μια αντίστοιχη μαύρη επιφάνεια στην ίδια θερμοκρασία και για συγκεκριμένη γωνία εκπομπής φ .

$$\varepsilon = \varepsilon(\lambda, \varphi, T) \quad (2-17)$$

$$E_{b\lambda} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2-18)$$

Για συγκεκριμένο μήκος κύματος κάνουμε λόγο για τον μονοχρωματικό συντελεστή εκπομπής ε_λ . Ο νόμος του Kirchhoff διατυπώνεται ως εξής:

Ο μονοχρωματικός συντελεστής εκπομπής μιας επιφάνειας είναι ίσος με το μονοχρωματικό συντελεστή απορρόφησης, ανεξαρτήτως της διαφοράς θερμοκρασιών που αντιστοιχούν στην εκπεμπόμενη (T_1) και στην προσπίπτουσα (T_2) ακτινοβολία.

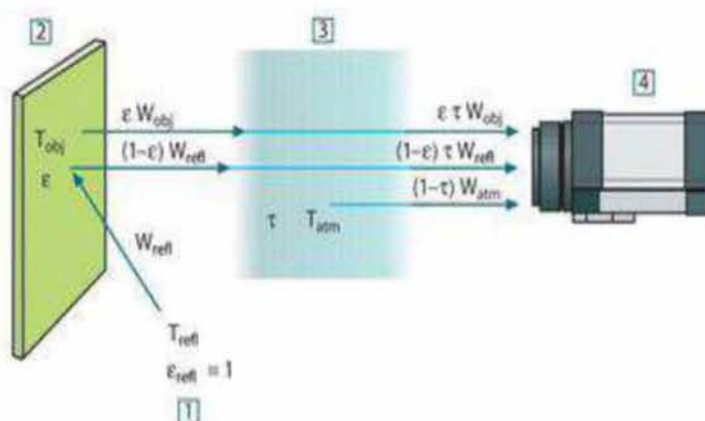
$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (2-19)$$

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω για τους νόμους που διέπουν την θερμική ακτινοβολία μπορούμε να προχωρήσουμε στην αρχή λειτουργίας της θερμικής κάμερας.

2.7 Αρχή λειτουργίας της θερμικής κάμερας

Η θερμική κάμερα δέχεται την ακτινοβολία του αντικειμένου σκόπευσης που μας ενδιαφέρει καθώς επίσης και την ακτινοβολία του περιβάλλοντος μέσω της ανάκλασης από το αντικείμενο. Οι συνεισφορές αυτές της ακτινοβολίας μπορούν να εξασθενήσουν ως ένα βαθμό από την ατμόσφαιρα. Σε αυτό το σημείο όμως έρχεται να προστεθεί μια ακόμη συνεισφορά ακτινοβολίας, αυτή της ατμόσφαιρας.

Η περιγραφή που θα ακολουθήσει, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω, είναι μια αρκετά καλή περιγραφή πραγματικών συνθηκών. Αυτά που αγνοούνται είναι για παράδειγμα η διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας και οι σκόρπιες ακτινοβολίες έξω από το πεδίο θέασης. Για αυτό το λόγο επιλέγουμε να κάνουμε τις μετρήσεις μας, εξασφαλίζοντας χαμηλή στάθμη φωτισμού. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει βασίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 2.8 Αρχή λειτουργίας της θερμικής κάμερας.

Θεωρούμε ότι η λαμβάνουσα θερμική ακτινοβολία W από ένα μέλαν σώμα που βρίσκεται σε θερμοκρασία T_{source} σε μια κοντινή απόσταση, παράγει μια ισχύ εξόδου U_{source} που είναι ανάλογη της ισχύος εισόδου. Δηλαδή:

$$U_{source} = C \cdot W_{source} \quad (2-20)$$

Η αντίστοιχη θερμική ακτινοβολία ενός σώματος θα είναι τότε $\varepsilon \cdot W_{source}$

Συγκεντρώνοντας τώρα τους τρεις όρους της ακτινοβολίας που δέχεται η κάμερα:

α) Εκπομπή από το αντικείμενο $\varepsilon \cdot \tau \cdot W_{object}$, όπου ε ο συντελεστής εκπομπής, τ ο συντελεστής διάδοσης της ατμόσφαιρας και T_{object} η θερμοκρασία του αντικειμένου.

β) Ανακλώμενη ακτινοβολία από εξωτερικές πηγές $(1-\varepsilon) \cdot W_{refl}$, όπου $(1-\varepsilon)$ ο συντελεστής ανάκλασης του αντικειμένου. Οι εξωτερικές πηγές βρίσκονται σε θερμοκρασία T_{refl}

γ) Εκπομπή από τη ατμόσφαιρα $(1-\tau) \cdot \tau \cdot W_{atm}$, όπου $(1-\tau)$ ο συντελεστής εκπομπής της ατμόσφαιρας και T_{atm} η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας.

Αθροιστικά η συνολική ακτινοβολία που λαμβάνει η κάμερα είναι:

$$U_{tot} = \varepsilon \cdot \tau \cdot U_{obj} + (1-\varepsilon) \cdot \tau \cdot U_{refl} + (1-\tau) \cdot U_{atm} \Leftrightarrow$$

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon \cdot \tau} \cdot U_{tot} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot U_{refl} - \frac{1-\tau}{\varepsilon \cdot \tau} \cdot U_{atm} \quad (2-21)$$

Όπου U_{obj} η υπολογιζόμενη ισχύς εξόδου για ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας T_{obj} , η οποία μπορεί να μετατραπεί απευθείας στη ζητούμενη θερμοκρασία του αντικειμένου.

Όπου U_{tot} η πραγματική μετρούμενη από τη θερμική κάμερα ισχύς εξόδου.

Όπου U_{refl} η θεωρητική ισχύς εξόδου για ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία T_{refl} σύμφωνα με τη διακρίβωση.

Όπου U_{atm} : η θεωρητική ισχύς εξόδου για ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία T_{atm} σύμφωνα με τη διακρίβωση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο χρήστης της θερμικής κάμερας οφείλει να εισάγει τις ακόλουθες παραμέτρους:

- α) Το συντελεστή εκπομπής του αντικειμένου σκόπευσης.
- β) Την απόσταση του αντικειμένου σκόπευσης από την κάμερα.
- γ) Την ατμοσφαιρική θερμοκρασία.
- δ) Την υγρασία της ατμόσφαιρας.
- ε) Τη θερμοκρασία των παρακείμενων αντικειμένων.

Στον πίνακα 2.2 που ακολουθεί φαίνονται τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά της θερμικής κάμερας FLIR P45 thermaCAM.

Spatial resolution	1,3 mrad
Accuracy	$\pm 2^{\circ}\text{C}/\pm 3.6^{\circ}\text{F}$ or $\pm 2\%$ of reading
Image frequency	50/60 Hz non-interlaced
Focus	Automatic or manual
Digital image enhancement	Adaptive digital noise reduction
Detector type	Focal plane array (FPA), uncooled Microbolometer 320 x 240 pixels
Spectral range	7.5-13 μm
Viewfinder	Built-in, high resolution color LCD (TFT)
Temperature range	Temperature range is subject to customer configuration, and/or three-digit camera type number. Refer to the camera menu system to see available temperature ranges.
Laser locatIR type	Semiconductor AlGaInP diode laser 1 mW/635 nm (red)
Battery type	Rechargeable Li/ion battery
Battery operating time	1.5-2 hours. Display shows battery status
Battery charging	In camera (AC adapter) or stand-alone 2-bay charger
AC operation	AC adapter, 90-260 VAC, 50/60Hz, 12 VDC out
Voltage	9-16 VDC (11-16 VDC when charging)
Operating temperature range	-15 to +50 C (+5 to +122 F)
Storage temperature range	-40 to +70 C (-40 to +158 F)
Humidity	Operating & storage: 10-95 %, non-condensing
Encapsulation	IP 54 (IEC 529)
Shock	25 g, IEC 68-2-29
Vibration	2 g, IEC 68-2-6

Πίνακας 2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά της FLIR thermaCAM P45

Κεφάλαιο 3 Πειραματική μεθοδολογία

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται διεξοδικά οι πειραματικές μέθοδοι και τεχνικές που εφαρμόστηκαν προκειμένου να μετρηθεί η ισχύς που εξέρχεται από τη συσκευή προσομοίωσης και να απεικονιστεί το θερμοκρασιακό πεδίο κατά μήκος ενός heat pipe. Αρχικά αναλύεται η μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας του αέρα που εξέρχεται από τη συσκευή, στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος μέτρησης της θερμοκρασίας, τόσο του αέρα που εξέρχεται από τη συσκευή, όσο και του πυρήνα από χαλκό. Τέλος για τη μελέτη του θερμοκρασιακού πεδίου κατά μήκος του heat pipe θα γίνει παρουσίαση της μεθοδολογίας image processing.

3.1 Μετρήσεις ταχύτητας του αέρα

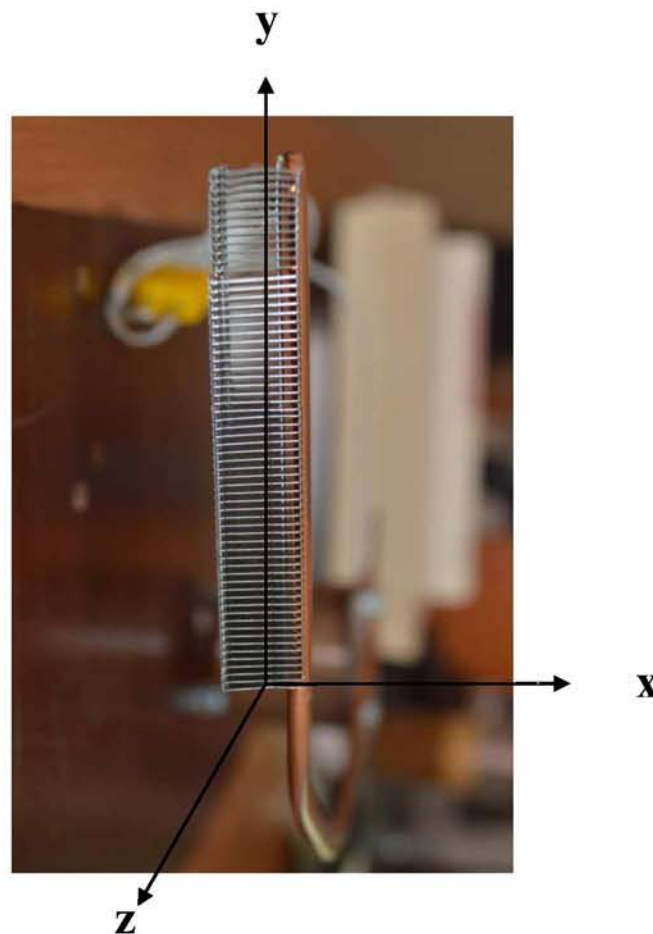
Για τη μέτρηση της θερμότητας ανά μονάδα χρόνου, που εξέρχεται από το heat pipe, χρειάστηκε να πάρουμε μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα κατά την έξοδο του από τα πτερύγια ψύξης. Αρχικά χρειάστηκε να οριστεί ένα δεξιόστροφο ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων για τη σωστή συνεννόηση των εμπλεκόμενων στις μετρήσεις, έτσι ορίστηκε το σύστημα αξόνων στο τμήμα του συμπυκνωτή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Στη συνέχεια οι μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα έλαβαν χώρα με τη μέθοδο της θερμοανεμομετρίας με δυο διαφορετικά όργανα.

α) Με το φορητό θερμοανεμόμετρο της εταιρείας TSI, το οποίο αποτελεί μια "εύκολη" λύση, καθώς στερείται ακρίβειας, αφού μετράει τις μέσες τιμές ταχύτητας κάθε φορά.

β) Με το θερμοανεμόμετρο υψηλής ανάλυσης, το οποίο υπερτερεί σε ακρίβεια, αφού μετράει στιγμιαίες τιμές ταχύτητας και είναι κατάλληλο ακόμη και για τη μέτρηση της τύρβης, ωστόσο χρήζει ιδιαίτερης προσοχής κατά το χειρισμό του, γεγονός που το καθιστά σχεδόν δύσχρηστο για μεγάλο αριθμό μετρήσεων, οι οποίες απαιτούνται στη συγκεκριμένη εργασία.

3.1.1 Μέτρηση μέσω τιμών

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το θερμοανεμόμετρο της εταιρείας TSI, model Velocicalc, για τη στήριξη του οποίου χρησιμοποιήθηκε ειδική βαθμονομημένη βάση που επέτρεπε την κατακόρυφη μετακίνηση του αισθητήρα του ανεμόμετρου. Ελήφθησαν 15 μετρήσεις κατά την κατακόρυφο από $y=0$ έως και $y=7,2$ cm.



Σχήμα 3.1 Σύστημα συντεταγμένων στο τμήμα του συμπυκνωτή

Ο αισθητήρας του οργάνου τοποθετήθηκε σε οριζόντια απόσταση $z=+1,5$ cm από την έξοδο του αέρα και στο κέντρο της διατομής για $\chi=0$ (βλ. σχήμα 3.1).

Η πρώτη και η τελευταία μέτρηση έγιναν ακριβώς στα άκρα της διατομής και όλες με σταθερό βήμα ίσο με 5,14 mm. Όλες οι μετρήσεις της ταχύτητας έγιναν "εν ψυχρώ" καθώς ο διακόπτης του soldering station ήταν σε θέση OFF. Η παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, επομένως ελήφθησαν 4 ομάδες μετρήσεων για 1,5 V 3 V 4,5 V και 6 V. Το πρωτόκολλο μετρήσεων που τηρήθηκε ήταν το ακόλουθο.

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	19/5/2017
ΣΥΝΟΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	15
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΒΗΜΑ (cm)	0,5143
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ (°C)	24
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΨΗΚΤΡΑ (mm)	15

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

1	ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ SOLDERING STATION→ OFF
2	ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ FAN→ON
3	ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→1,5 Volt
4	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΟΡΓΑΝΟΥ ΣΤΗ ΒΑΣΗ $Y=0$
5	ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΘΕΣΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
6	ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ
7	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΟΡΓΑΝΟΥ ΚΑΤΑ ΜΙΑ ΘΕΣΗ ΕΠΑΝΩ
8	ΕΠΑΝΑΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 5 ΕΩΣ 7 15 ΦΟΡΕΣ
9	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΟΡΓΑΝΟΥ ΣΤΗ ΒΑΣΗ $Y=0$
10	ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→3 Volt
11	ΕΠΑΝΑΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 5 ΕΩΣ 7 15 ΦΟΡΕΣ
12	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΟΡΓΑΝΟΥ ΣΤΗ ΒΑΣΗ $Y=0$
13	ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→4,5 Volt
14	ΕΠΑΝΑΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 5 ΕΩΣ 7 15 ΦΟΡΕΣ
15	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΟΡΓΑΝΟΥ ΣΤΗ ΒΑΣΗ $Y=0$
16	ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→6 Volt
17	ΕΠΑΝΑΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 5 ΕΩΣ 7 15 ΦΟΡΕΣ

3.1.2 Μέτρηση στιγμιαίων τιμών

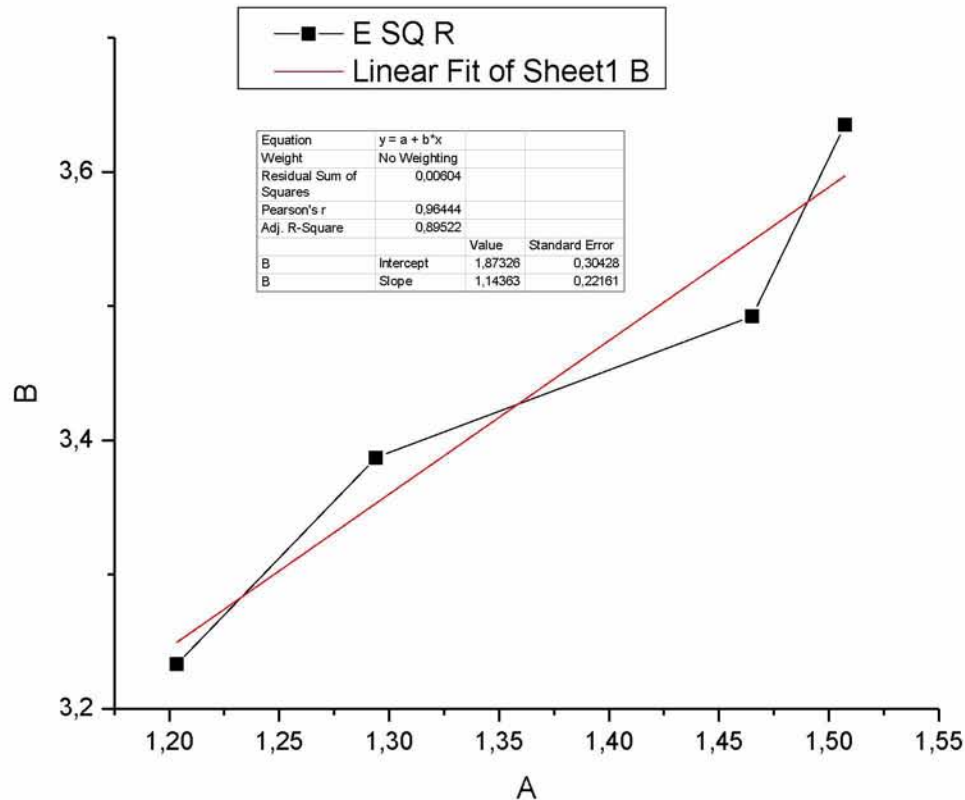
Αρχικά γίνεται μέτρηση του σήματος $E(t)$ σε Volts που προέρχεται από τον ενισχυτή του θερμό-ανεμόμετρου Hot Wire. Ο αισθητήρας Hot Wire, διαμέτρου 5 μm , τοποθετήθηκε

σε οριζόντια απόσταση $z=+1,5$ cm από την έξοδο του αέρα και στο κέντρο της διατομής για $x=0$ (βλ. σχήμα 3.1), ώστε να μετράει την κεντρική αξονική ταχύτητα U_c της δέσμης του αέρα. Η παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, η οποία έλαβε τις τιμές [1.5 3 4.5 και 6] Volts.

Από τη θεωρία θερμό-ανεμομετρίας (μετάδοση θερμότητας από θερμαινόμενο νήμα) προκύπτει ότι τα Volts V και οι αντίστοιχες ταχύτητες U συνδέονται με την σχέση που λέγεται νόμος του King :

$$V^2 = A + B \cdot U^n \quad (3.1)$$

Όπου A και B προσδιοριστέες σταθερές και n εκθέτης της τάξης του 0.45, ενώ για τον προσδιορισμό των σταθερών A και B χρησιμοποιήθηκε μέθοδος βελτιστοποίησης (Linear fit) από το υπολογιστικό πακέτο ORIGIN.



Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης ήταν $A=1,87326$ και $B=1,14363$. Με αυτό τον τρόπο είμαστε σε θέση να μετατρέψουμε τα Volts των μετρήσεων σε ταχύτητα του αέρα με βάση την παρακάτω σχέση που προκύπτει από το νόμο του King:

$$U(t) = \left(\frac{V^2 - A}{B} \right)^{1/n} = \left(\frac{V^2 - 1,87326}{1,14363} \right)^{2,2222} \quad (3.2)$$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μετρήσεις στη στήλη E, για κάθε περίπτωση τάσης τροφοδοσίας του ανεμιστήρα και οι ταχύτητες του αέρα.

FAN VOLTS	E (Volts)	TAXYTHTA (m/s)
1,5	1,79081	1,407384752
3	1,84045	1,865322179
4,5	1,86888	2,166402843
6	1,90664	2,613154797



Σχήμα 3.2 Ο αισθητήρας διαμέτρου 5 μm και ο ενισχυτής του θερμο-ανεμόμετρου

3.2 Μετρήσεις θερμοκρασίας του αέρα

Για τη μέτρηση της ισχύος που εξέρχεται από το heat pipe, χρειάστηκε να πάρουμε μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα κατά την έξοδο του από τα πτερύγια ψύξης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το θερμο-ανεμόμετρο της TSI Velocicalc. για τη στήριξη του χρησιμοποιήθηκε ειδική βάση που επέτρεπε την κατακόρυφη μετακίνηση του αισθητήρα του ανεμόμετρου. Ο αισθητήρας του οργάνου τοποθετήθηκε σε οριζόντια απόσταση $z=+1,5\text{ cm}$ από την έξοδο του αέρα και στο κέντρο της διατομής για $\chi=0$ (βλ. σχήμα 3.1).

Ελήφθησαν 15 μετρήσεις κατά την κατακόρυφο, Η πρώτη μέτρηση έγινε για $y=0$ και οι υπόλοιπες με σταθερό βήμα ίσο με $+5,14\text{ mm}$. Η παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, επομένως ελήφθησαν 4 ομάδες μετρήσεων για 1,5V 3V 4,5V και 6V. Το πρωτόκολλο μετρήσεων που τηρήθηκε ήταν το ακόλουθο.

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	19/5/2017
ΣΥΝΟΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	15
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΒΗΜΑ (cm)	0,5143
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ (°C)	24
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΨΗΚΤΡΑ (mm)	15

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

- 1 ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ SOLDERING STATION→ ON
- 2 ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ FAN→ON
- 3 ΠΕΡΙΜΕΝΕ 1 ΩΡΑ
- 4 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΟΡΓΑΝΟΥ ΣΤΗ ΒΑΣΗ $Y=0$
- 5 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΘΕΣΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
- 6 ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→1,5 Volt
- 7 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ
- 8 ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→3 Volt
- 9 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ
- 10 ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→4,5 Volt
- 11 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ
- 12 ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→6 Volt
- 13 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ
- 14 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΟΡΓΑΝΟΥ ΚΑΤΑ ΜΙΑ ΘΕΣΗ ΠΑΝΩ
- 15 ΕΠΑΝΕΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 5 ΕΩΣ 14 15 ΦΟΡΕΣ
- 16 ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ SOLDERING STATION→ OFF
- 17 ΠΕΡΙΜΕΝΕ 1 ΩΡΑ
- 18 ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ FAN→OFF

Η ισχύς τροφοδοσίας στον πυρήνα από χαλκό ήταν σταθερή και ίση με 40 watt, ενώ πρέπει να τονιστεί ότι όλες οι μετρήσεις ελήφθησαν σε μόνιμη κατάσταση (περίπου μετά από μια ώρα θέρμανσης του πυρήνα).

3.3 Μετρήσεις θερμοκρασίας στον πυρήνα

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν απολύτως ουσιαστικό να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία του πυρήνα από χαλκό σε κάθε χρονική στιγμή. Έτσι ώστε να είμαστε σε θέση να καθορίσουμε το εάν βρισκόμαστε σε μεταβατικό ή μόνιμο φαινόμενο κάθε χρονική στιγμή. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε θερμοστοιχείο το οποίο ήταν τοποθετημένο στο κέντρο του χάλκινου κυλίνδρου προς τη μεριά του εξαερωτήρα του heat pipe (βλ. σχήμα 3.3)



Σχήμα 3.3 Το θερμοστοιχείο στον πυρήνα από χαλκό

το οποίο ήταν συνδεδεμένο με το transmitter jumo και το οποίο με τη σειρά του ήταν συνδεδεμένο με τον μετατροπέα σήματος της National Instruments ο οποίος διαβίβαζε τα ψηφιακά πλέον δεδομένα σε Η/Υ, όπου και αποθηκεύονταν. Η διαδικασία της λήψης και αποθήκευσης των αποτελεσμάτων έγινε με το λογισμικό Labview, το οποίο παρείχε τη δυνατότητα επιλογής τόσο του ρυθμού συλλογής των αποτελεσμάτων (sample rate),όσο και της χρονικής διάρκειας συλλογής αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα

αποθηκεύονταν σε αρχείο μορφής txt, και μπορούσαν να ανασυρθούν για περαιτέρω επεξεργασία με το υπολογιστικό πακέτο excel.



Σχήμα 3.4 Το transmitter Jumo, το τροφοδοτικό Telemechanique και ο μετατροπέας σήματος της National Instruments

Ελήφθησαν 4 ομάδες μετρήσεων, με παράμετρο την τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα για {1,5V 3V 4,5V 6V}. Η κάθε ομάδα μετρήσεων είχε διάρκεια 7200 sec. Τα πρώτα 3600 sec αφορούσαν τη θέρμανση του πυρήνα, καθώς ο διακόπτης του soldering station τίθετο σε θέση ON από το πρώτο δευτερόλεπτο.

Στη συνέχεια στα 3600 sec ο ίδιος διακόπτης τίθετο σε θέση OFF οπότε μεταβαίναμε στη ψύξη του πυρήνα. Το sample rate ήταν 1 Hz σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και εφαρμόστηκε σε όλες τις μετρήσεις θερμοκρασιών στον πυρήνα.

Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η οριακή τιμή της θερμοκρασίας του πυρήνα τόσο κατά τη θέρμανση, όσο και κατά τη ψύξη. Υπάρχουν αρκετά μαθηματικά εργαλεία για τον προσδιορισμό της, ωστόσο για τους σκοπούς της παρούσης κρίθηκε ότι ο μέσος όρος των 200 τελευταίων τιμών σε μόνιμο φαινόμενο, μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Έτσι η οριακή τιμή της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση, είναι ο μέσος όρος των τιμών της θερμοκρασίας από τα 3400 έως και τα 3600 sec. Ομοίως η οριακή τιμή της θερμοκρασίας

κατά τη ψύξη, είναι ο μέσος όρος των τιμών της θερμοκρασίας από τα 7000 έως και τα 7200 sec.

Για την ορθή διεξαγωγή των μετρήσεων της θερμοκρασίας του πυρήνα, ήταν απαραίτητο ένα πρωτόκολλο μετρήσεων έτσι ώστε να καταγραφούν με σαφήνεια και ακρίβεια οι μετρήσεις των θερμοκρασιών του πυρήνα. Το πρωτόκολλο μετρήσεων που τηρήθηκε, στην προκειμένη περίπτωση, ήταν το ακόλουθο.

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΠΥΡΗΝΑ

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	12/5/2017
ΣΥΝΟΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	4
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ (°C)	24

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

- | | |
|----|---|
| 1 | ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ SOLDERING STATION→ OFF |
| 2 | ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→1,5 Volt |
| 3 | ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ FAN→ON |
| 4 | ΕΝΑΡΞΗ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΣΕ PC HARD DISC/ΛΗΨΗ ΧΡΟΝΟΥ |
| 5 | ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ SOLDERING STATION→ ON |
| 6 | ΠΕΡΙΜΕΝΕ 3600 SEC |
| 7 | ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ FAN→OFF |
| 8 | ΠΕΡΙΜΕΝΕ 3600 SEC |
| 9 | PRINT SCREEN |
| 10 | ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→3 Volt |
| 11 | ΕΠΑΝΑΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 3 ΕΩΣ 9 |
| 12 | ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→4,5 Volt |
| 13 | ΕΠΑΝΑΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 3 ΕΩΣ 9 |
| 14 | ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→6 Volt |
| 15 | ΕΠΑΝΑΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 3 ΕΩΣ 9 |

3.4 Μετρήσεις θερμοκρασίας με χρήση θερμόμετρου IR χειρός.

Για την απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου κατά μήκος του heat pipe και παράλληλα με τις μετρήσεις των θερμοκρασιών στον πυρήνα, χρησιμοποιήθηκε το IR θερμόμετρο χειρός. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν δειγματοληπτικά κάθε 15 λεπτά της ώρας, προκειμένου να αποκτήσουμε μια πρώτη εικόνα του θερμοκρασιακού πεδίου, προτού υπεισέλθουμε σε βαθιά και λεπτομερή απεικόνιση του, με τη βοήθεια της θερμικής κάμερας

FLIR. Οι μετρήσεις με το IR θερμόμετρο έλαβαν χώρα τόσο κατά τη θέρμανση όσο και κατά τη ψύξη του πυρήνα, σε τρία συγκεκριμένα σημεία του heat pipe α) στον εξαερωτήρα β) στο κέντρο του αδιαβατικού τμήματος και γ) στο συμπυκνωτή. Η παράμετρος των μετρήσεων αυτών ήταν η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, οπότε τελικά εξήχθησαν 4 ομάδες μετρήσεων για {1,5V 3V 4,5V 6V}. Το πρωτόκολλο μετρήσεων που τηρήθηκε ήταν το ακόλουθο

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ IR ΧΕΙΡΟΣ

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	19/5/2017
ΣΥΝΟΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	96
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ (°C)	24

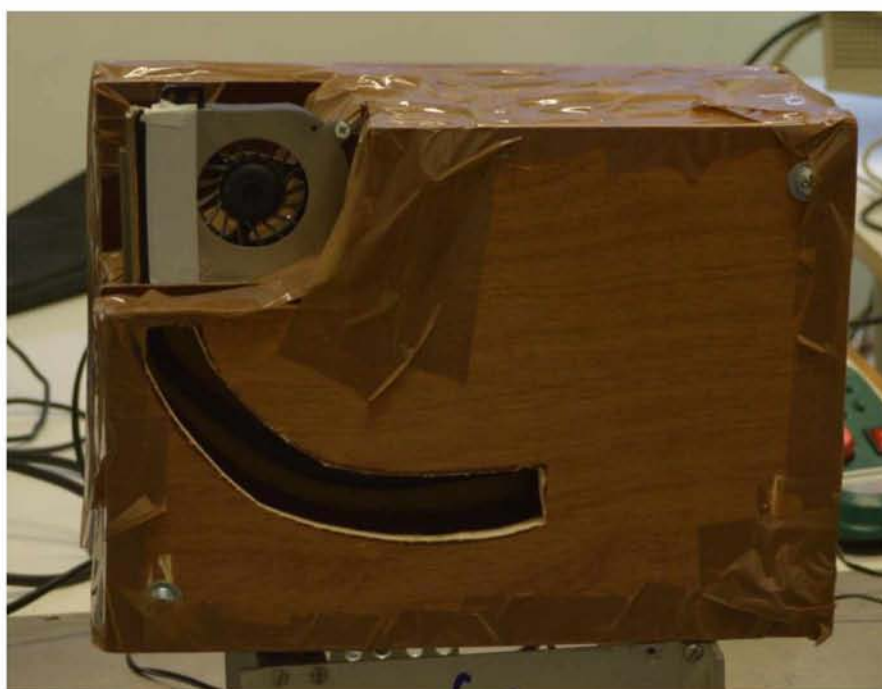
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

1	ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ SOLDERING STATION→ OFF
2	ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ FAN→ON
3	ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→1,5 Volt
4	ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΟΥ
5	ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ SOLDERING STATION→ ON
6	ΠΕΡΙΜΕΝΕ 15 ΛΕΠΤΑ
7	ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ EVAPORATOR
8	ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ADIABATIC
9	ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ CONDENSER
10	ΕΠΑΝΑΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ ΑΠΟ 6 ΕΩΣ 9 ΓΙΑ 8 ΦΟΡΕΣ
11	ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→3 Volt
12	ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΟΥ
13	ΕΠΑΝΑΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ ΑΠΟ 6 ΕΩΣ 9 ΓΙΑ 8 ΦΟΡΕΣ
14	ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→4,5 Volt
15	ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΟΥ
16	ΕΠΑΝΑΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ ΑΠΟ 6 ΕΩΣ 9 ΓΙΑ 8 ΦΟΡΕΣ
17	ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ FAN→6 Volt
18	ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΟΥ
19	ΕΠΑΝΑΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ ΑΠΟ 6 ΕΩΣ 9 ΓΙΑ 8 ΦΟΡΕΣ
20	ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ SOLDERING STATION→ OFF
21	ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ FAN→OFF

3.5 Μεθοδολογία image processing

Για την ανάλυση των βίντεο χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ThermoCAM Researcher Pro 2.8 SR-3 το οποίο επιτελεί την επικοινωνία (interface) μεταξύ βιντεοκάμερας και Η/Υ και χάρη στο οποίο έχουμε τη δυνατότητα να καταγράφουμε και να αποθηκεύουμε την εικόνα που λαμβάνει η θερμική κάμερα, και στη συνέχεια να την υποβάλλουμε σε περαιτέρω επεξεργασία.

Στη παρούσα πειραματική διαδικασία η θερμική κάμερα της εταιρείας FLIR τοποθετήθηκε στο ίδιο κατακόρυφο ύψος με τη συσκευή προσομοίωσης και σε οριζόντια απόσταση 1,5 m από αυτή. Η καταγραφή του βίντεο πραγματοποιήθηκε από τη στιγμή που το σύστημα ξεκίνησε να θερμαίνεται, συνέχισε σε μόνιμες συνθήκες λειτουργίας και εν συνεχεία κατά τη ψύξη του. Η συνολική διάρκεια του φαινομένου ήταν 75 λεπτά της ώρας, για αυτό το λόγο η βιντεοσκόπηση δεν ήταν συνεχής αλλά δειγματοληπτική, καθώς βιντεοσκοπήθηκε το φαινόμενο για ένα λεπτό και σταματούσε η βιντεοσκόπηση για 3 λεπτά και ούτω καθ' εξής.



Σχήμα 3.5 Η συσκευή προσομοίωσης της λειτουργίας του Η/Υ



Σχήμα 3.6 Τοποθέτηση της θερμικής κάμερας σε τρίποδο



Σχήμα 3.7 Ρύθμιση της οριζόντιας απόστασης κάμερας-συσκευής στο 1,5 m

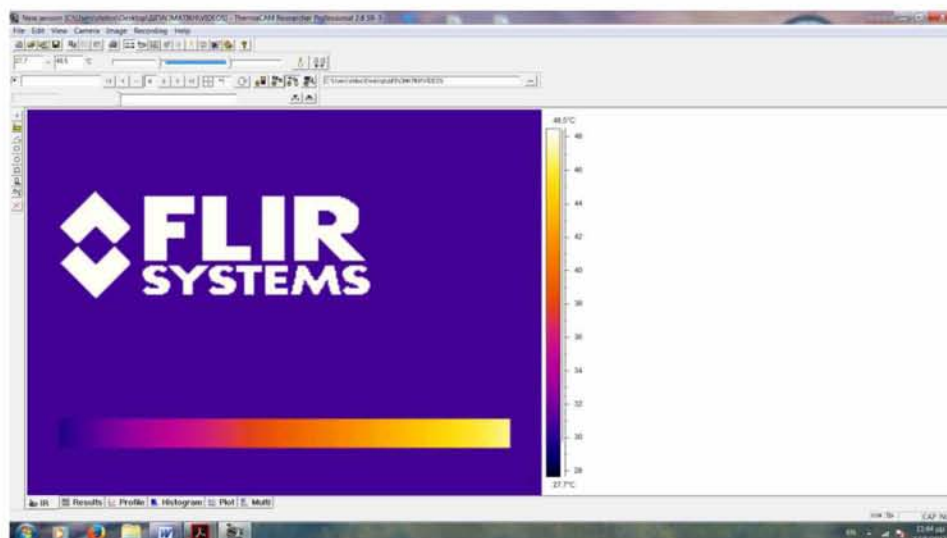
Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται οι χρόνοι έναρξης και λήξης της βιντεοσκόπησης, όπως επίσης η διάρκεια του κάθε βίντεο και ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι την έναρξη της επόμενης βιντεοσκόπησης.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα κατά τη διάρκεια των λήψεων ήταν 6V και ο διακόπτης του soldering station τέθηκε σε θέση ON τη στιγμή που ξεκίνησε η βιντεοσκόπηση του πρώτου βίντεο.

FLIR CAMERA TIMETABLE

	REC START TIME	REC STOP TIME	DURATION	NEXT VIDEO IN
1	12:33:15,767	12:34:42,482	01:26,7	02:06,5
2	12:36:49,032	12:37:51,955	01:02,9	02:02,0
3	12:39:53,975	12:40:54,511	01:00,5	02:04,0
4	12:42:58,487	12:43:59,256	01:00,8	03:04,7
5	12:47:03,987	12:48:04,34	01:00,4	03:03,0
6	12:51:07,352	12:52:06,887	00:59,5	03:03,3
7	12:55:10,228	12:56:09,971	00:59,7	03:02,0
8	12:59:11,979	13:00:12,213	01:00,2	03:02,1
9	13:03:14,264	13:04:14,322	01:00,1	03:02,0
10	13:07:16,368	13:08:16,826	01:00,5	03:03,0
11	13:11:19,857	13:12:20,411	01:00,6	03:03,6
12	13:15:24,008	13:16:46,517	01:22,5	03:08,5
13	13:19:55,020	13:20:56,382	01:01,4	03:07,4
14	13:24:03,736	13:27:04,507	03:00,8	03:06,1
15	13:30:10,635	13:31:20,433	01:09,8	03:06,7
16	13:34:27,174	13:35:48,417	01:21,2	03:04,7
17	13:38:53,124	13:40:24,323	01:31,2	02:50,7
18	13:43:15,047	13:44:26,087	01:11,0	02:43,6
19	13:47:09,731	13:48:13,129	01:03,4	-
TOTAL			23:13,2	

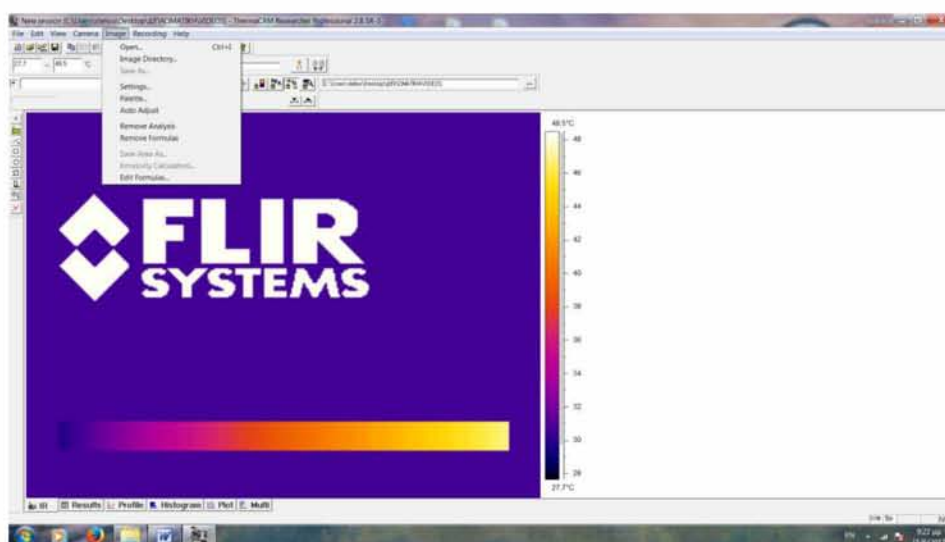
Στη συνέχεια τα βίντεο αποθηκεύτηκαν στη μνήμη του υπολογιστή με σκοπό την επεξεργασία τους, από το λογισμικό της εταιρείας FLIR. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά και βήμα-βήμα η διαδικασία που ακολουθήθηκε μέχρι και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Αρχικά τρέχουμε το πρόγραμμα Thermacam Researcher Pro 2.8 SR-3



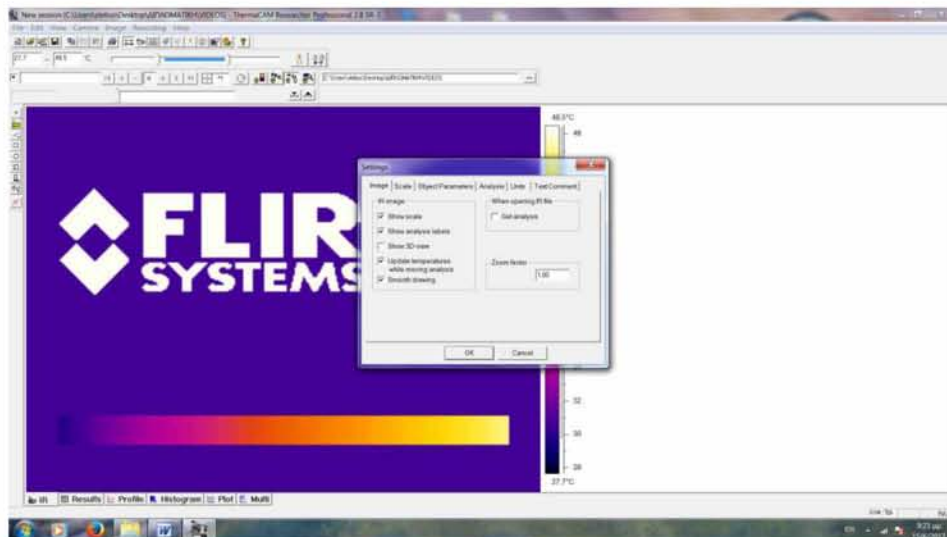
Σχήμα 3.8 Έναρξη προγράμματος Thermacam Researcher Pro 2.8 SR-3

Έπειτα αναζητούμε το αποθηκευμένο βίντεο στον υπολογιστή μας και το εισάγουμε στην εφαρμογή. Κατόπιν ρυθμίζουμε τις παραμέτρους που αφορούν στη δική μας περίπτωση.

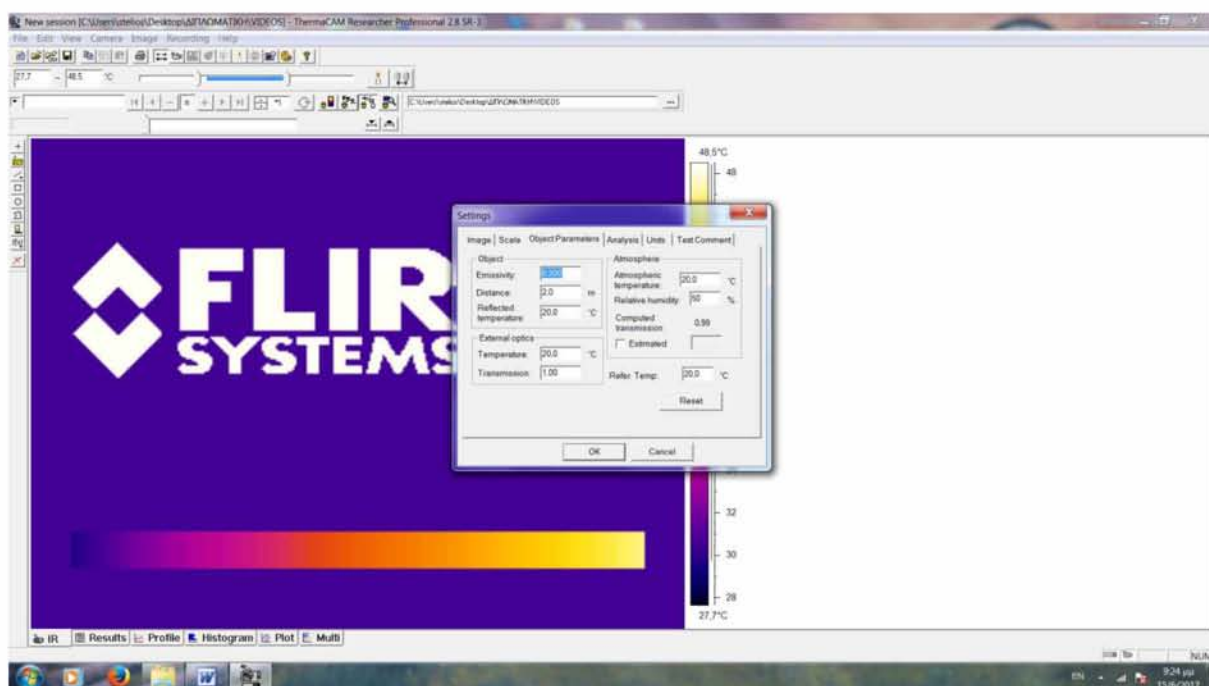
Επιλέγουμε image μετά settings και διαλέγουμε από το αναδυόμενο μενού τις ρυθμίσεις που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε. Το σημαντικότερο πεδίο για την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων είναι το object parameters.



Σχήμα 3.9 Εισαγωγή βίντεο στο λογισμικό



Σχήμα 3.10 Άνοιγμα του menu των ρυθμίσεων



Σχήμα 3.11 Εισαγωγή των ρυθμίσεων

Στο πεδίο object parameters εισήχθησαν οι παρακάτω τιμές:

emissivity=0,78: αφορά στον συντελεστή εκπομπής της θερμαινόμενης επιφάνειας, όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα μιας στερεής επιφάνειας τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής εκπομπής. Η τιμή που επιλέχθηκε αφορά τον χαλκό σε καθαρή μορφή. Τιμές για

τους συντελεστές εκπομπής είναι δυνατό να ανευρεθούν από το πεδίο help και μετά emissivity tables.

distance=1,5 m: Αφορά την απόσταση του φακού της θερμικής κάμερας από το προς εξέταση αντικείμενο.

Reflected temperature=22: Αφορά τη θερμοκρασία των αντικειμένων που γειτνιάζουν με το προς εξέταση αντικείμενο μας, και επιλέχθηκε τιμή ίση με την ατμοσφαιρική.

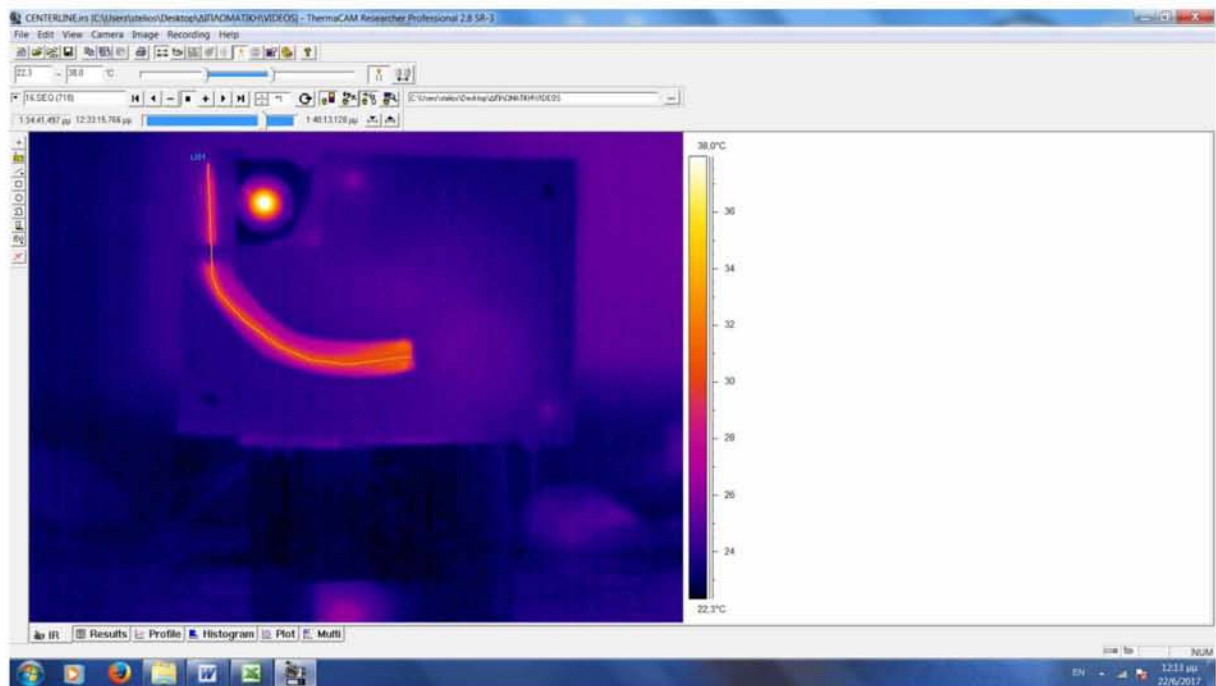
Atmospheric temperature=22: Πρόκειται για την ατμοσφαιρική θερμοκρασία κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

relative humidity=50%: Πρόκειται για τη σχετική υγρασία στο χώρο, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

θερμοκρασιακό εύρος= [18,78]. Όταν είναι γνωστή εκ των προτέρων η φύση του προβλήματος που εξετάζει κανείς είναι δυνατό να ρυθμίσει ένα θερμοκρασιακό εύρος μέσα στο οποίο θα κυμανθεί το φαινόμενο και ταυτόχρονα να αντιλαμβάνεται την εξέλιξή του με βάση την εικόνα. Για αυτό το λόγο ρυθμίστηκε το θερμοκρασιακό εύρος στην περίπτωση μας σε [18,78]. Αρχικά όπου η θερμοκρασία ήταν ομοιόμορφη στους 20 °C, η εικόνα με βάση την υπέρυθη ακτινοβολία ήταν όλη μαύρη με βάση τη χρωματική κλίμακα. Στη συνέχεια όμως που η θερμοκρασία του heat pipe άρχισε να αυξάνει, το χρώμα του άρχισε να μεταβάλλεται προς πιο ανοιχτές αποχρώσεις (μωβ) δίνοντας μας έτσι την αίσθηση της μεταφοράς θερμότητας. Ωστόσο για να εντοπιστεί το αντικείμενό μας σε περίπτωση που ακόμα δεν έχει εξελιχθεί το φαινόμενο και δεν υπάρχουν οι απαιτούμενες θερμοκρασιακές διαφορές για τη διάκριση των αντικειμένων σε ένα τόσο μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος, υπάρχει η δυνατότητα της αυτόματης ρύθμισης του θερμοκρασιακού εύρους με την εντολή auto-adjust-scale που λαμβάνει ως όρια την ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία που αντιλαμβάνεται η θερμική κάμερα κι έτσι τα διάφορα αντικείμενα ξεχωρίζουν με βάση τις πολύ μικρές θερμοκρασιακές τους διαφορές που γίνονται αντιληπτές σε αυτό το επίπεδο.

Η λήψη των αντιπροσωπευτικών τιμών θερμοκρασίας πάνω στον αγωγό, αποτελεί στην ουσία τα δεδομένα προς επεξεργασία για την εξαγωγή των συμπερασμάτων μας. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

α) Η ανάλυση με βάση την κεντρική γραμμή. Κατά την ανάλυση με βάση την κεντρική γραμμή επιλέχθηκαν όλα τα βίντεο (19) και εισήχθησαν στο πρόγραμμα. Στη συνέχεια δεξί κλικ, Add Analysis, Line, Bendable Line και φέρουμε τη γραμμή στο κέντρο κατά μήκος του αγωγού.

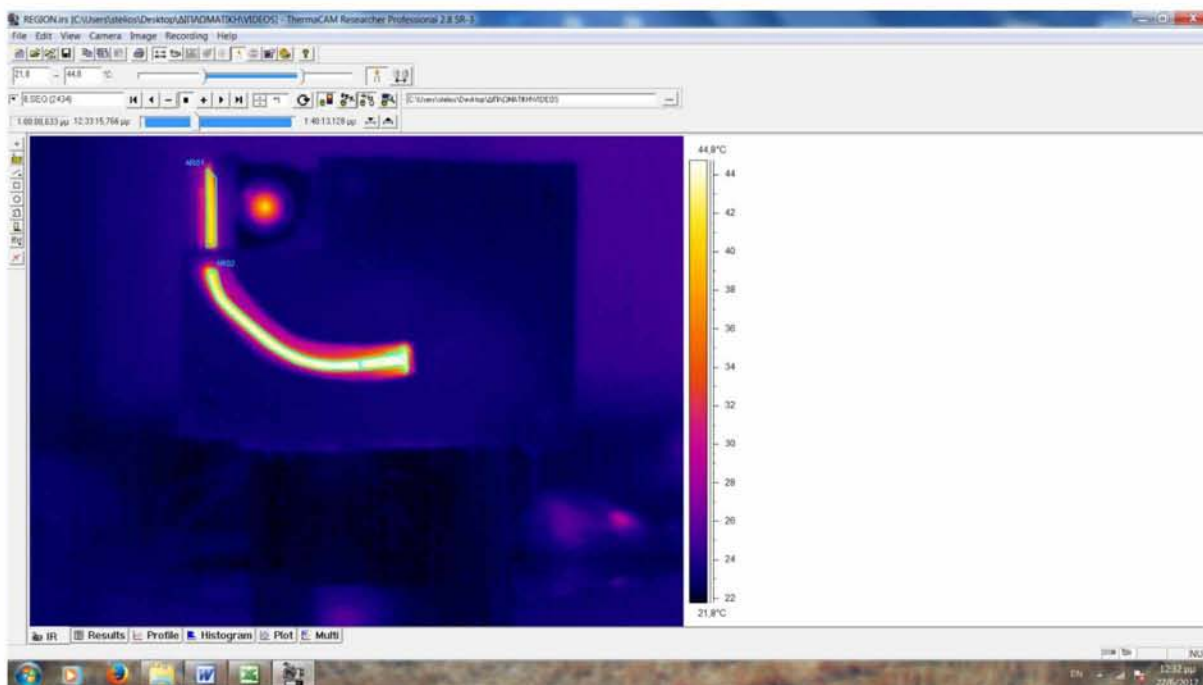


Σχήμα 3.12 Ανάλυση με βάση την κεντρική γραμμή

Στη συνέχεια πατώντας play ή F4 μπορούμε να αναπαράγουμε τα βίντεο και πατώντας το πεδίο PROFILE μπορούμε να διακρίνουμε τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου κατά μήκος του αγωγού. Από το πεδίο RESULTS μπορούμε να εξάγουμε δεδομένα κάθε χρονική στιγμή και να τα αποθηκεύουμε σε ξεχωριστό αρχείο για μετέπειτα επεξεργασία. Στη προκειμένη περίπτωση η αποθήκευση έγινε σε αρχείο EXCEL.

β) Η ανάλυση με βάση τις περιοχές. Ολόκληρη η επιφάνεια του αγωγού χωρίστηκε σε 3 διαφορετικές περιοχές, χωρίς αλληλοεπικάλυψη με τις ονομασίες AR01, AR02 και AR03 που είναι στην ουσία οι περιοχές του συμπτυκνωτή, της αδιαβατικής περιοχής και του εξαερωτήρα

αντίστοιχα. Αρχικά επιλέχθηκαν όλα τα βίντεο (19) και εισήχθησαν στο πρόγραμμα. Στη συνέχεια δεξί κλικ, Add Analysis, Polygon, και επιλέγουμε τις τρεις περιοχές ξεκινώντας από το συμπυκνωτή στη συνέχεια την αδιαβατική περιοχή και τέλος τον εξαερωτήρα.



Σχήμα 3.13 Ανάλυση με βάση τις περιοχές

Στη συνέχεια πατώντας play ή F4 μπορούμε να αναπαράγουμε τα βίντεο και πατώντας το πεδίο PROFILE μπορούμε να διακρίνουμε τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου, στις τρεις αυτές περιοχές. Από το πεδίο RESULTS μπορούμε να εξάγουμε δεδομένα κάθε χρονική στιγμή και να τα αποθηκεύουμε σε ξεχωριστό αρχείο για μετέπειτα επεξεργασία. Στη προκειμένη περίπτωση η αποθήκευση έγινε σε αρχείο EXCEL.

γ) Η ανάλυση με βάση τα σημεία. Σε αυτή τη περίπτωση επιλέξαμε τρεις περιοχές πάλι αλλά σημαντικά μικρότερες από τη προηγούμενη ανάλυση. AR01, AR02 και AR03 που είναι στην ουσία οι περιοχές στο συμπυκνωτή, στην αδιαβατική περιοχή και στον εξαερωτήρα αντίστοιχα. Οι περιοχές αυτές είναι οι ίδιες με αυτές στις οποίες ελήφθησαν θερμοκρασίες με χρήση θερμομέτρου IR χειρός, έτσι ώστε να τις αντιπαραβάλλουμε. Αρχικά επιλέχθηκαν όλα τα βίντεο (19) και εισήχθησαν στο πρόγραμμα. Στη συνέχεια δεξί κλικ, Add Analysis,

Polygon, και επιλέγουμε τις τρεις περιοχές ξεκινώντας από το συμπυκνωτή στη συνέχεια την αδιαβατική περιοχή και τέλος τον εξαερωτήρα.



Σχήμα 3.14 Ανάλυση με βάση τα σημεία

Στη συνέχεια πατώντας play ή F4 μπορούμε να αναπαράγουμε τα βίντεο και πατώντας το πεδίο PROFILE μπορούμε να διακρίνουμε τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου στις τρεις αυτές περιοχές. Από το πεδίο RESULTS μπορούμε να εξάγουμε δεδομένα κάθε χρονική στιγμή και να τα αποθηκεύουμε σε ξεχωριστό αρχείο για μετέπειτα επεξεργασία. Στη προκειμένη περίπτωση η αποθήκευση έγινε σε αρχείο EXCEL.

Κεφάλαιο 4 Πειραματική διάταξη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση της εργασίας. Αρχικά αναλύονται οι σχεδιαστικές παράμετροι και περιορισμοί που ελήφθησαν υπ' όψη, ώστε το μοντέλο μας να ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες, ακολουθεί ο τρόπος κατασκευής της συσκευής προσομοίωσης, με πλειάδα σχεδίων και φωτογραφιών και τέλος παρουσιάζονται τα όργανα μετρήσεων, η συνδεσμολογίες τους και οι αναγκαίες υποστηρικτικές διατάξεις.

4.1 Σχεδιασμός της συσκευής προσομοίωσης

Για τους σκοπούς της παρούσης εργασίας, κρίθηκε αναγκαία προϋπόθεση ο σχεδιασμός διάταξης η οποία θα προσομοίωνε τη διαδικασία ψύξης ενός επεξεργαστή φορητού Η/Υ με τη βοήθεια ενός Heat Pipe, σε κλίμακα 1:1, υποβοηθούμενο από έναν ανεμιστήρα, όπως ακριβώς συμβαίνει στη συντριπτική πλειοψηφία των φορητών Η/Υ.

Αρχικά, για την προσομοίωση του τμήματος του επεξεργαστή, ήταν απαραίτητο να επιλέξουμε κάποιο υλικό με εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα και θερμική διαχυτότητα καθώς θα έπρεπε να μπορεί να φτάσει σχετικά γρήγορα σε μόνιμες συνθήκες λειτουργίας και κυρίως χωρίς διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του. Η λύση να χρησιμοποιηθεί άργυρος ($k=429\text{W/mK}$, στους 300K) ή διαμάντι τύπου ΙΑ ($k=2300\text{W/mK}$, στους 300K) ήταν πέρα των οικονομικών δυνατοτήτων, ενώ η λύση να χρησιμοποιηθεί αυτούσιος ο επεξεργαστής ενός Η/Υ δεν ήταν δυνατή, εξαιτίας των μεγάλων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας, κατά τη λειτουργία του. Έτσι επιλέχθηκε ως υλικό κατασκευής του πυρήνα της συσκευής ο χαλκός

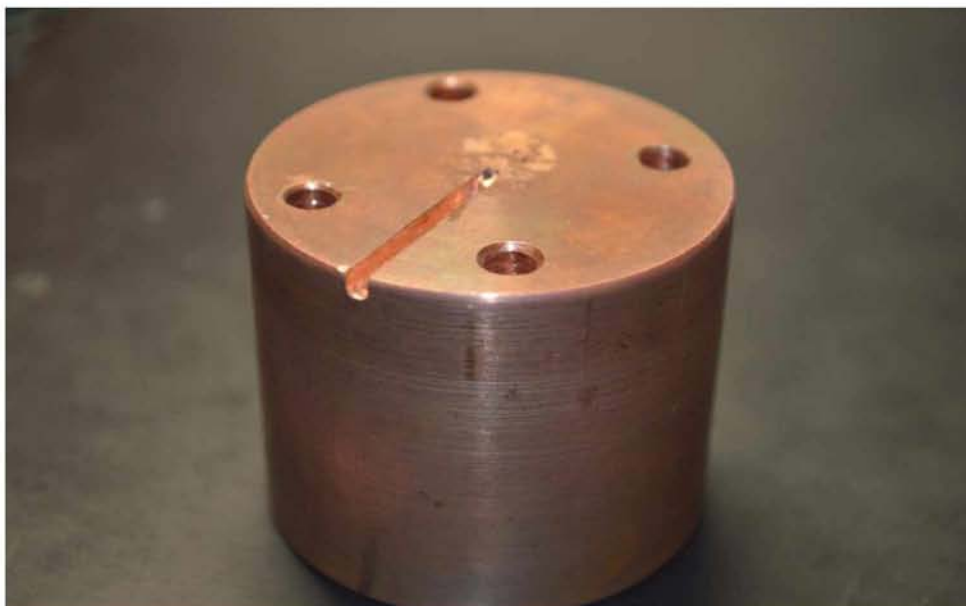
($k=401\text{W/mK}$, $\alpha=117\cdot10^6\text{m}^2/\text{s}$, στους 300K) και πιο συγκεκριμένα κυλινδρικό τεμάχιο διαμέτρου 50 mm ύψους 42 mm.

4.2 Κατασκευή της συσκευής προσομοίωσης

Για πρακτικούς λόγους συναρμογής και ακεραιότητας της συσκευής κρίθηκε αναγκαία η διάνοιξη τεσσάρων οπών διαμέτρου 5 mm καθ' όλο το ύψος του πυρήνα, μιας οπής διαμέτρου 4 mm σε βάθος 19 mm και στη συνέχεια με διεύρυνση 11 mm σε βάθος 16 mm με σκοπό την ενθυλάκωση του soldering iron. Επίσης διανοίχθηκε κανάλι διαστάσεων 4mm x 4mm ακτινικά στη διεπιφάνεια πυρήνα-εξαερωτήρα, μήκους 25 mm για τη δρομολόγηση του θερμοστοιχείου στο κέντρο του πυρήνα (βλ. σχήματα 4.1, 4.2).



Σχήμα 4.1 Ο πυρήνας από χαλκό με την κεντρική οπή ενθυλάκωσης του soldering iron και τις τέσσερις οπές για τις κοχλιοσυνδέσεις.



Σχήμα 4.2 Ο πυρήνας από χαλκό με το κανάλι τοποθέτησης του θερμοστοιχείου και τις τέσσερις οπές για τις κοχλιοσυνδέσεις.

Για την παροχή θερμότητας στον πυρήνα από χαλκό, επιλέχθηκε το soldering station της εταιρείας Parkside, τύπος (PLS 48 C1), με δυνατότητα επίτευξης εύρους θερμοκρασιών 0-500 °C . Οι αναγραφόμενες προδιαγραφές του είναι 230 V, 50 Hz και ονομαστική ισχύς 48 Watt (βλ. σχήμα 4.3). Σε αυτό το σημείο είναι κρίσιμο να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη τιμή της ισχύος απαντάται σε πλειάδα H/Y και αποτελεί μια μέση λύση στο πρόβλημα επιλογής ισχύος εισόδου στη συσκευή.



Σχήμα 4.3 Το soldering station

Για την ελαχιστοποίηση της θερμικής αντίστασης μεταξύ των επιφανειών του πυρήνα και του τμήματος του εξαερωτήρα, χρησιμοποιήθηκε θερμό-αγώγιμη πάστα της εταιρείας Deep Cool, τύπος Z3 με θερμική αγωγιμότητα $k > 1.134 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας από -50°C έως 300°C (βλ. σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 Τοποθέτηση θερμό-αγώγιμης πάστας πριν τη συναρμολόγηση

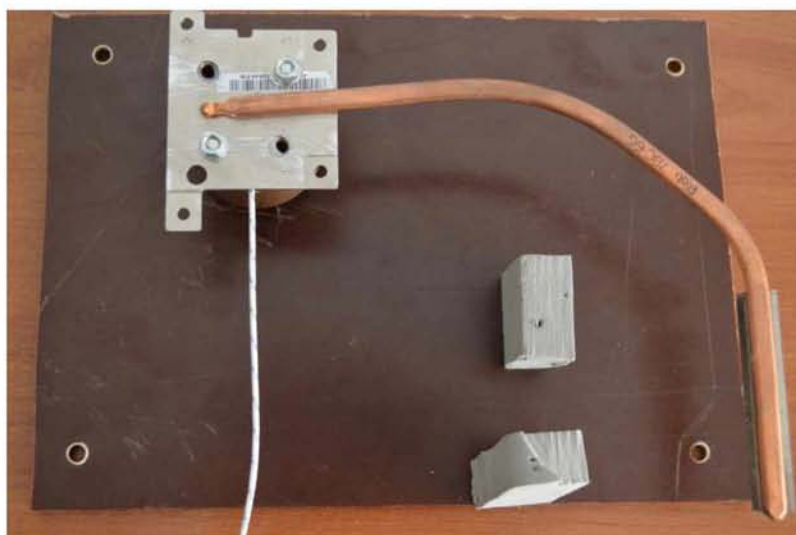
Για την απομάκρυνση της θερμότητας από τον πυρήνα από χαλκό, χρησιμοποιήθηκε heat pipe της εταιρείας Forcecon, μήκους 212 mm, πεπλατυσμένης διατομής 7,6 x 3,4 mm, ενώ η αρχική κυκλική του διατομή, πριν τη συμπίεση, ήταν 6mm. Το υλικό κατασκευής του περιβλήματος είναι χαλκός πάχους 0,5 mm, ενώ η δομή του φυτιλιού εσωτερικά είναι πυροσυσσωματωμένης κόνεως (sintered powder) πάχους επίσης 0,5 mm. Το εργαζόμενο μέσο εσωτερικά του heat pipe είναι απεσταγμένο νερό.

Το τμήμα του συμπυκνωτή φέρει 62 πτερύγια ψύξης από αλουμίνιο, ορθογωνικής διατομής, τα οποία βρίσκονται στην έξοδο του αέρα από τον ανεμιστήρα και αποβάλλουν τη θερμότητα μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά του heat pipe.

<i>Characteristic</i>	<i>Dimensions/Material</i>
Evaporator length L_e	30 mm
Condenser Length L_c	72 mm
Adiabatic length L_{ad}	110 mm
Flat heat pipe	7.6 mm × 3.4 mm (width × thickness)
Original diameter (OD)	6 mm
Heat pipe Container thickness	0.5 mm
Wick thickness	0.5 mm
Working fluid	Water
Wick structure	Sintered copper powder
Material of pipe	Copper

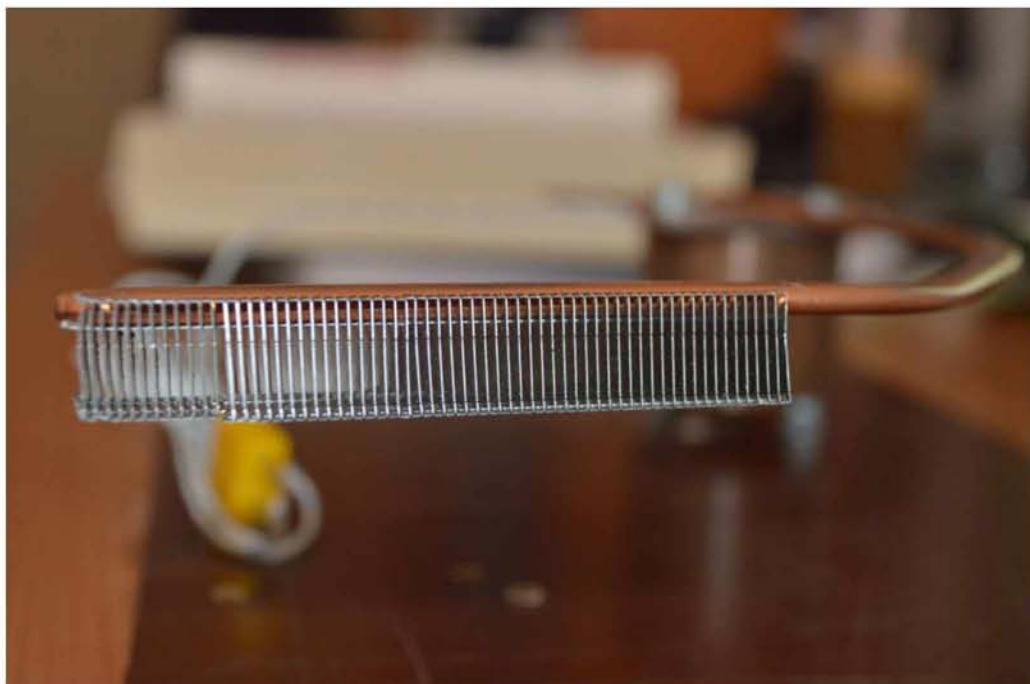
Σχήμα 4.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά του heat pipe



Σχήμα 4.6 Το heat pipe κατά τη συναρμολόγηση

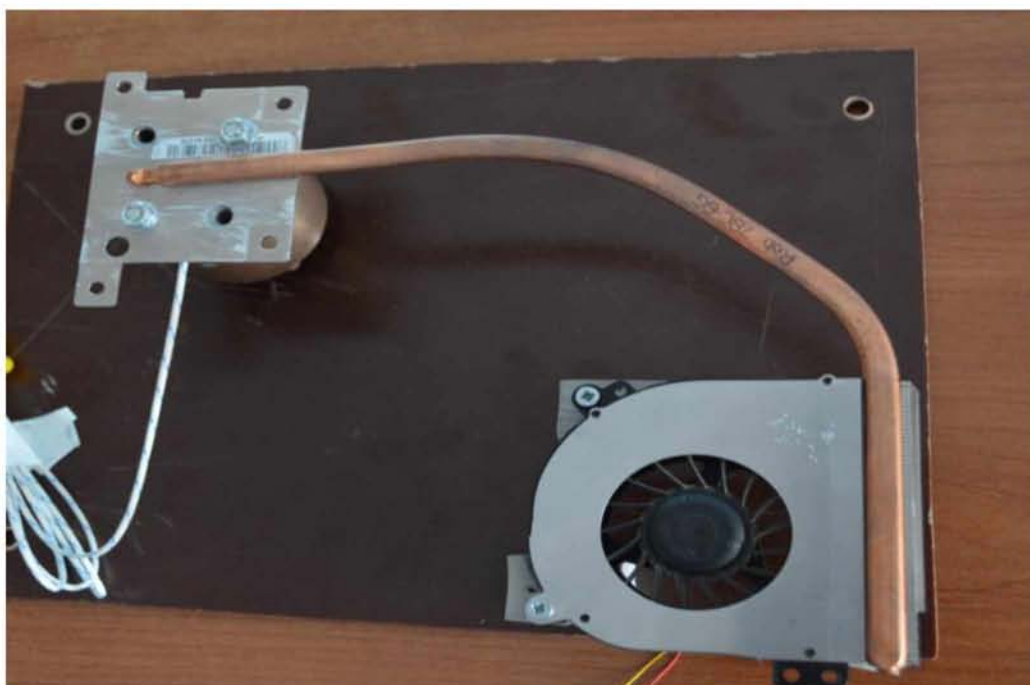


Σχήμα 4.7 Heat pipe σε τομή, όπου φαίνεται η δομή του φυτλίου Sintered powder



Σχήμα 4.8 Τα πτερύγια ψύξης στο τμήμα του συμπυκνωτή

Ο ανεμιστήρας είναι τύπου φουσητήρα (Blower) και πιο συγκεκριμένα ακτινικής ροής, της εταιρείας Forcecon, τύπος F6J0-CW, και συνεργάζεται με ηλεκτροκινητήρα (Brushless Motor) συνεχούς τάσεως 5V και εντάσεως 0,5 A .



Σχήμα 4.9 Τοποθέτηση του ανεμιστήρα



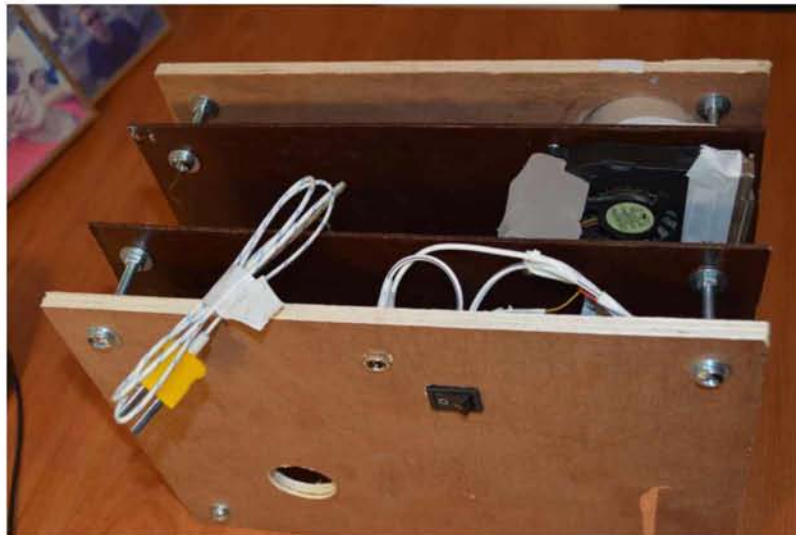
Σχήμα 4.10 Βάνιμο του heat pipe μαύρο ματ

Τα παραπάνω στοιχεία εδράζονται σε δυο επιφάνειες διαστάσεων 280 mm x 200 mm πάχους 2mm από βακελίτη, εκατέρωθεν του οποίου έχει τοποθετηθεί μόνωση από υαλοβάμβακα πάχους 50 mm και εσωκλείονται με δυο τεμάχια από sea plywood διαστάσεων 280 mm x 200 mm και πάχους 7 mm. Τέλος έγινε διάνοιξη παραθύρου για την οπτική επαφή της θερμικής κάμερας με το heat pipe.



Σχήμα 4.11 Παράθυρο σκόπευσης της κάμερας FLIR στο heat pipe

Η συσκευή ολοκληρώνεται με τη διάνοιξη των απαραίτητων οπών για τις διάφορες κοχλιοσυνδέσεις, όπως επίσης και την τοποθέτηση ενός διακόπτη για το έλεγχο της λειτουργίας του ανεμιστήρα και ενός ταχυσυνδέσμου για την παροχή συνεχούς ηλεκτρικής ισχύος στον κινητήρα του ανεμιστήρα.



Σχήμα 4.12 Τοποθέτηση διακόπτη του fan και ταχυσύνδεσμου παροχής συνεχούς ισχύος

Τέλος στο εσωτερικό ολόκληρης της συσκευής, πλην του παραθύρου πρόσβασης στο heat pipe, τοποθετήθηκε υαλοβάμβακας πάχους 50 mm για τον περιορισμό των θερμικών απωλειών από το εξωτερικό περίβλημα της συσκευής και νάilon ταινία για τη συγκράτηση του υαλοβάμβακα.



Σχήμα 4.13 Ολοκλήρωση κατασκευής της συσκευής

4.3 Όργανα μετρήσεων

Για την εκπόνηση της παρούσης εργασίας, απαιτήθηκε η διεξαγωγή μετρήσεων διαφόρων μεγεθών και η καταγραφή τους, ενώ ακολούθησε και κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων.

Αρχικά απαιτήθηκε η συνεχής μέτρηση της θερμοκρασίας του πυρήνα από χαλκό προκειμένου να διαπιστώσουμε/καθορίσουμε σε ποια χρονική στιγμή ολοκληρώνεται η μετάβαση σε μόνιμες συνθήκες λειτουργίας. Για τη συγκεκριμένη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε θερμοστοιχείο σε συνδυασμό με το transmitter Jumo και το μετατροπέα σήματος της National Instruments. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό ήταν το LABVIEW. Οι μετρήσεις ελήφθησαν με συχνότητα (sample rate) 1 Hz.

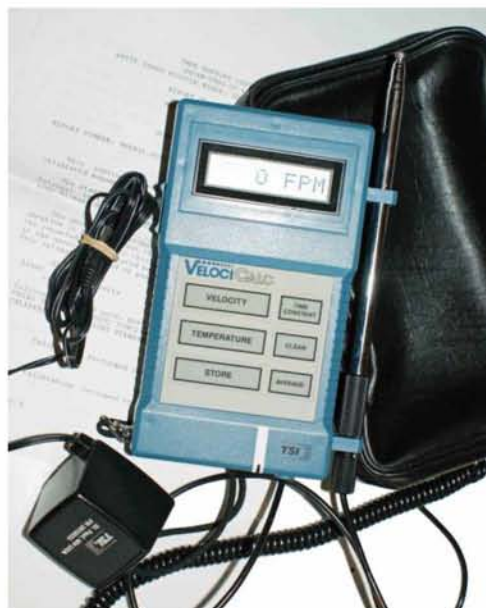


Σχήμα 4.14 Το transmitter jumo και το τροφοδοτικό της telemecanique



Σχήμα 4.15 Ο μετατροπέας σήματος της National Instruments

Στη συνέχεια απαιτήθηκαν μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα στην έξοδο του από τα πτερύγια ψύξης, για τον καθορισμό της θερμότητας που εγκαταλείπει τη συσκευή. Για τη συγκεκριμένη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε ανεμόμετρο της εταιρείας TSI inc, model Velocicalc 8352. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου σχετικά με τη ταχύτητα.



Σχήμα 4.16 Το θερμο-ανεμόμετρο της TSI Velocicalc

Appendix D

Specifications

DISPLAY 8-character LCD dot matrix; 0.28-in. character height, 4-digit display plus 3 characters for units

OPERATING TEMPERATURE RANGE

Instrument: 40°F to 125°F (5°C to 52°C)
 Probe: -30°F to 200°F (-34°C to +93°C)

VELOCITY

RANGE 15 to 9999 FPM (0.08 to 50.00 m/s)

	30 to 500 FPM	500 to 2000 FPM	2000 to 6000 FPM	6000 to 9999 FPM
RESOLUTION	1 FPM	5 FPM	10 FPM	20 FPM
ACCURACY*	2.5% rdg** ±2 FPM	2.5% rdg ±10 FPM	2.5% rdg ±50 FPM	2.5% rdg ±100 FPM

	0.15 to 2.5 m/s	2.5 to 10 m/s	10 to 30 m/s	30 to 50 m/s
RESOLUTION	0.01 m/s	0.03 m/s	0.05 m/s	0.1 m/s
ACCURACY*	2.5% rdg** ±0.01 m/s	2.5% rdg ±0.05 m/s	2.5% rdg ±0.2 m/s	2.5% rdg ±0.5 m/s

* Temperature compensated over an air temperature range of 40°F to 150°F (5°C to 65°C)

** rdg: of reading

Επιπλέον απαιτήθηκαν μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του από τα πτερύγια ψύξης, για τον καθορισμό της θερμότητας που εγκαταλείπει τη συσκευή. Και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το όργανο της εταιρείας TSI inc, model Velocicalc 8352. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου σχετικά με τη θερμοκρασία.

TEMPERATURE

MEASUREMENT RANGE	0°F to 200°F (-17.8°C to 93.3°C)
RESOLUTION	0.1°F (0.1°C)
ACCURACY	±0.5°F (0.28°C)*

BATTERIES	Four AA-size, alkaline or nickel-cadmium
INSTRUMENT DIMENSIONS	1.5 x 4.1 x 7.4 in. (38 x 105 x 190 mm) not including the probe mounting brackets
WEIGHT WITH PROBE	1.1 lb. (0.5 kg)
CARRYING CASE	1.75 x 6 x 9.5 in. (45 x 152 x 241 mm)
PROBE DIMENSIONS	telescoping, 7 to 21 in. (178 to 533 mm), 0.235-in.-dia. (6-mm-dia.) at tip
SERIAL INTERFACE	RS-232C Baud rate: 1200 Serial data format: 1 start bit; 8 data bits; 2 stop bits; no parity
Voltage levels:	Logic "1" = -4.5V logic "0" = +4.5V
AC ADAPTER	6 Vdc, 0.3 A

* Accuracy with instrument case at 77°F (25°C). Add uncertainty of 0.125°F/°F (0.075°C/°C) for change in instrument temperature.

Specifications are subject to change without notice.

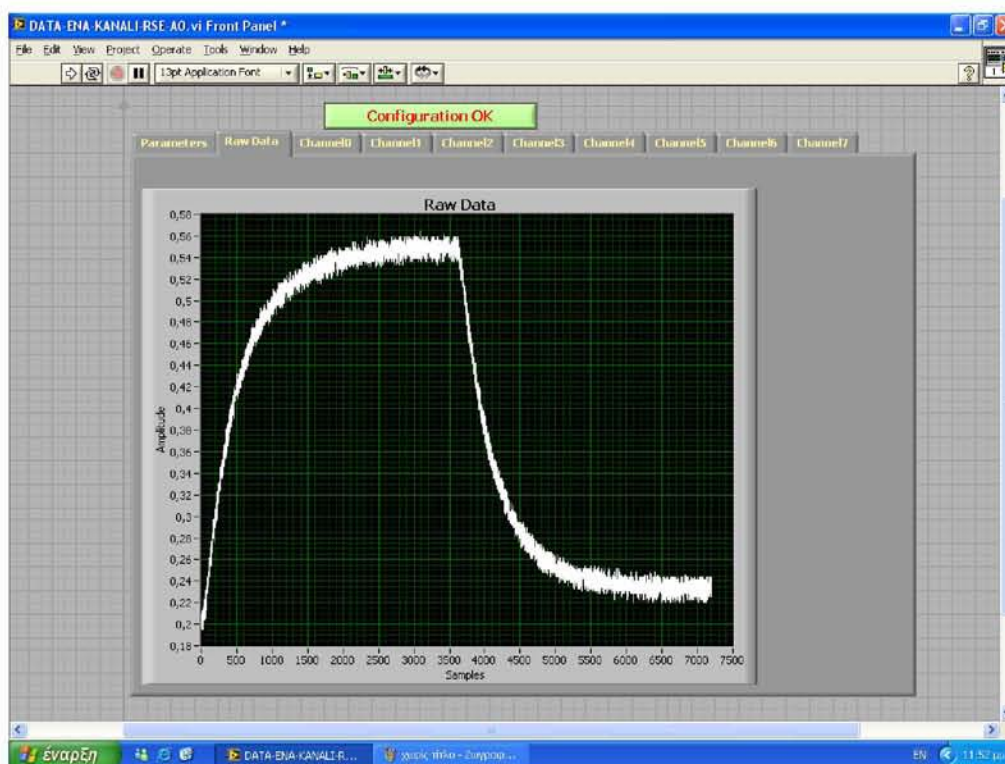
Τέλος, έγινε χρήση της θερμικής κάμερας ThermaCAM P45 της εταιρείας FLIR SYSTEMS, με την οποία βιντεοσκοπήθηκε το heat pipe τόσο σε μεταβατικές, όσο και σε μόνιμες συνθήκες λειτουργίας, αποθηκεύτηκαν τα βίντεο σε ξεχωριστό σκληρό δίσκο, και ακολούθησε ανάλυση των βίντεο με τη βοήθεια του λογισμικού της FLIR, Thermacam Researcher Pro 2.8 SR-3.

Κεφάλαιο 5 Διεξαγωγή των μετρήσεων

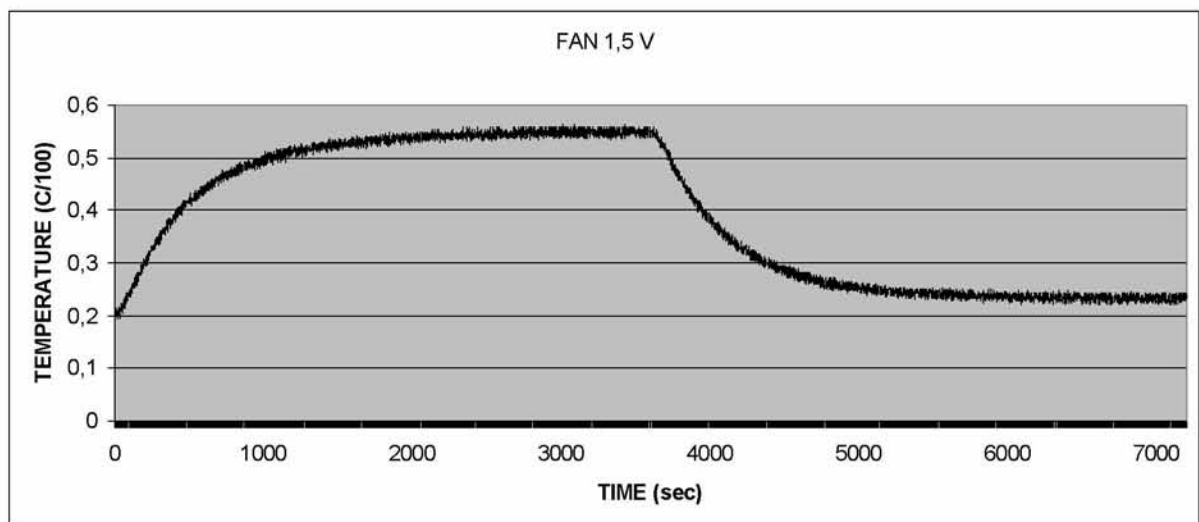
5.1 Θερμοκρασίες στον πυρήνα

Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3, ελήφθησαν τέσσερις ομάδες μετρήσεων θερμοκρασίας στον πυρήνα, ενώ τα δεδομένα αποθηκεύτηκαν σε H/Y για περαιτέρω επεξεργασία. Η παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε είναι η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα στο τμήμα του συμπυκνωτή του heat pipe, ενώ ο επιλογέας θερμοκρασιών του soldering station ήταν τοποθετημένος στη μέγιστη θερμοκρασία.

Αρχικά η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα τοποθετήθηκε στα 1,5 V και στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι θερμοκρασίες συναρτήσει του χρόνου.



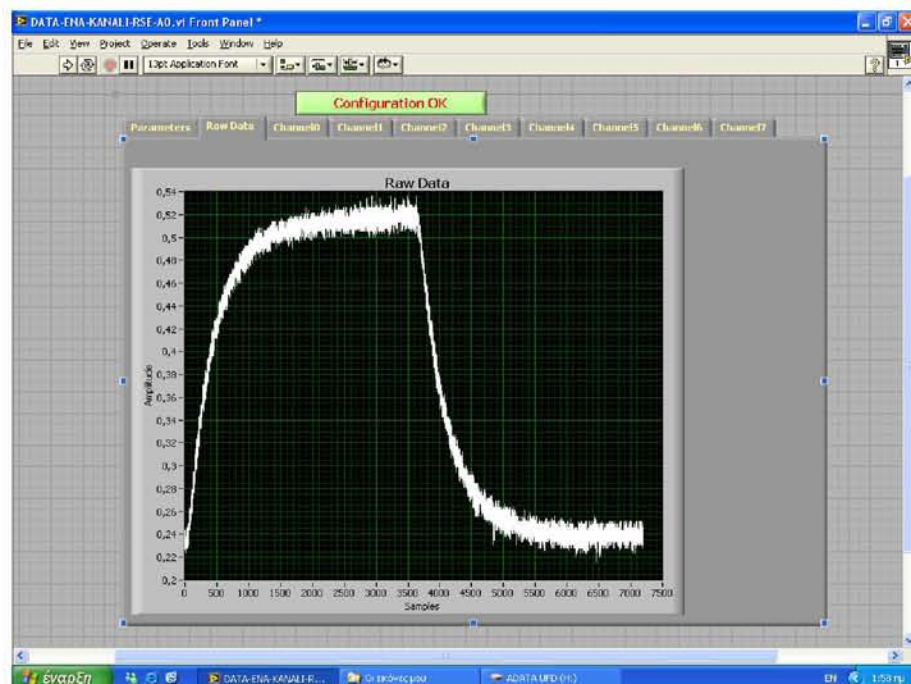
Σχήμα 5.1 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 1,5V



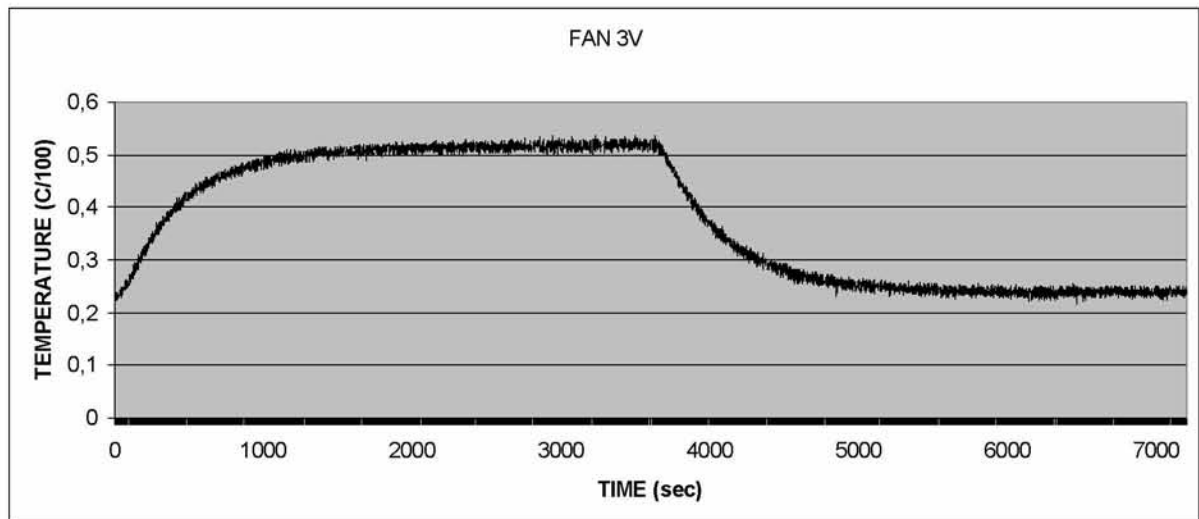
Σχήμα 5.2 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 1,5 V

Το παραπάνω διάγραμμα είναι τα ίδια δεδομένα σε αρχείο EXCEL. Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι η οριακή τιμή της θερμοκρασίας του πυρήνα μετά από 3600 sec θέρμανσης έφτασε στους **54,9 βαθμούς Κελσίου**, ενώ μετά από 3600 sec ψύξης, η θερμοκρασία του πυρήνα έφτασε οριακά στους **23,3 βαθμούς Κελσίου**.

Στη συνέχεια η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα ετέθη στα 3 V και στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι θερμοκρασίες συναρτήσει του χρόνου.



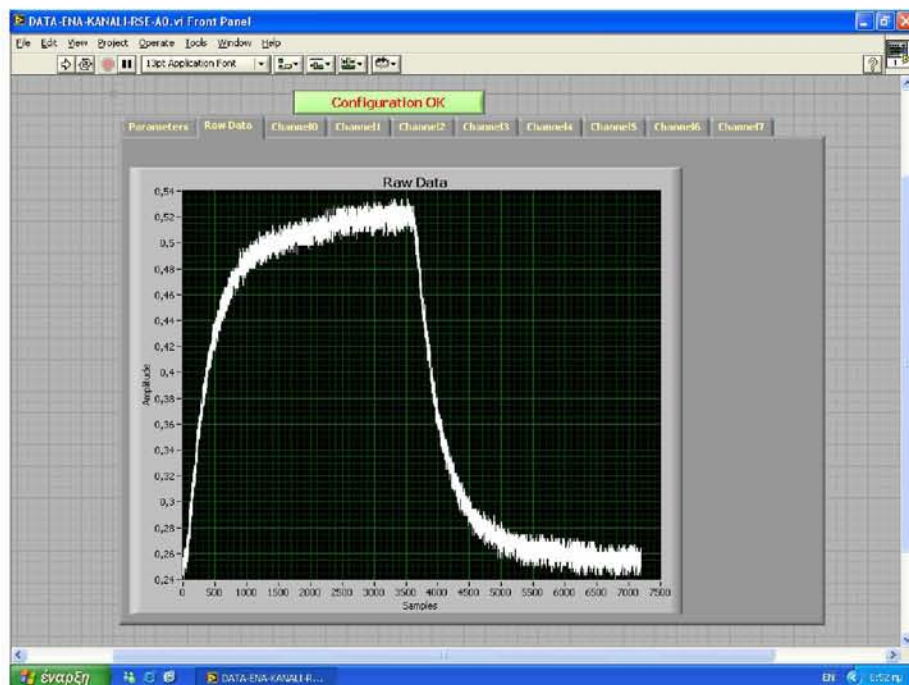
Σχήμα 5.3 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 3 V



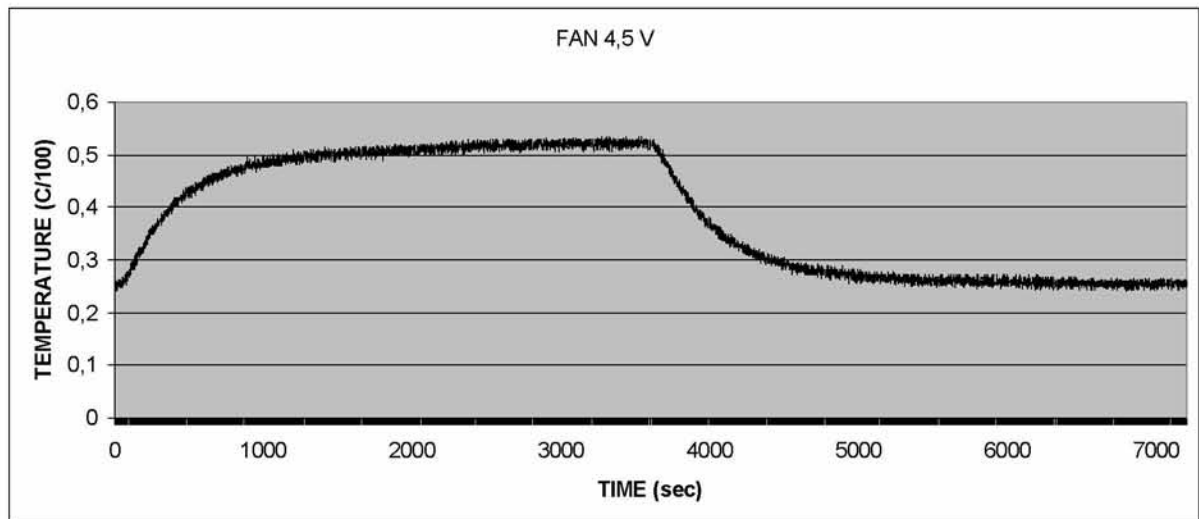
Σχήμα 5.4 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 4,5 V.

Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι η οριακή τιμή της θερμοκρασίας του πυρήνα μετά από 3600 sec θέρμανσης έφτασε στους **51,8 βαθμούς Κελσίου**, ενώ μετά από 3600 sec ψύξης, η θερμοκρασία του πυρήνα έφτασε οριακά στους **24 βαθμούς Κελσίου**.

Στη συνέχεια η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα ετέθη στα 4,5 V και στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι θερμοκρασίες συναρτήσει του χρόνου.



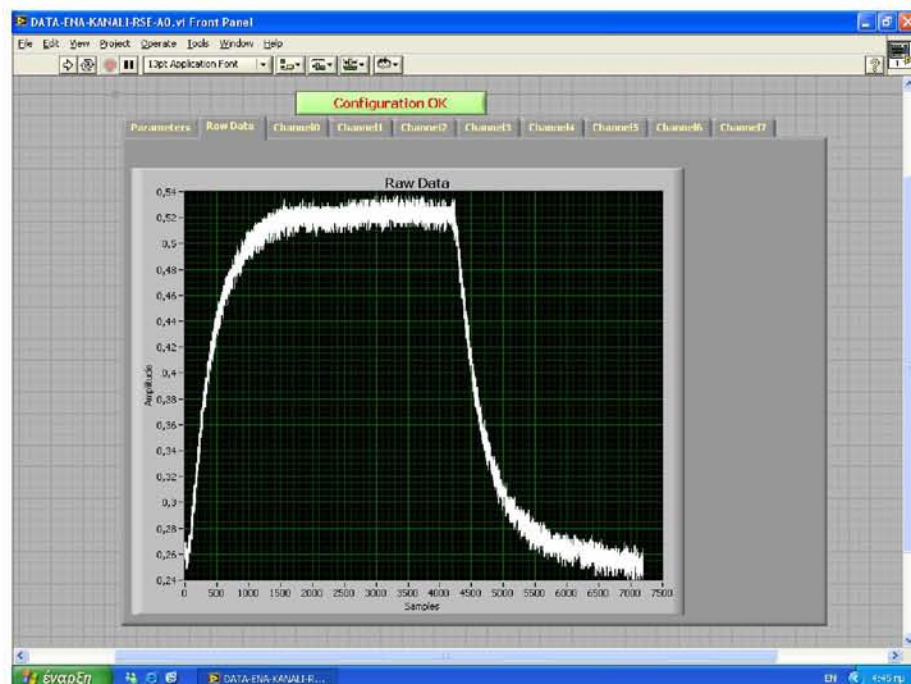
Σχήμα 5.5 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 4,5 V



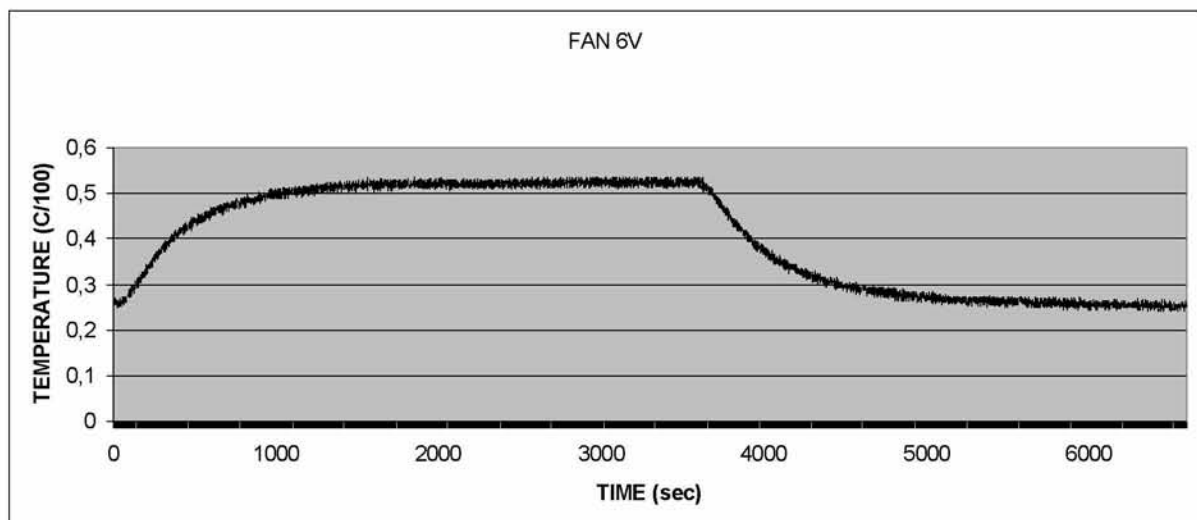
Σχήμα 5.6 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 4,5 V

Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι η οριακή τιμή της θερμοκρασίας του πυρήνα μετά από 3600 sec θέρμανσης έφτασε στους **52,1 βαθμούς Κελσίου**, ενώ μετά από 3600 sec ψύξης, η θερμοκρασία του πυρήνα έφτασε οριακά στους **25,6 βαθμούς Κελσίου**.

Στη συνέχεια η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα ετέθη στα 6 V και στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι θερμοκρασίες συναρτήσει του χρόνου.



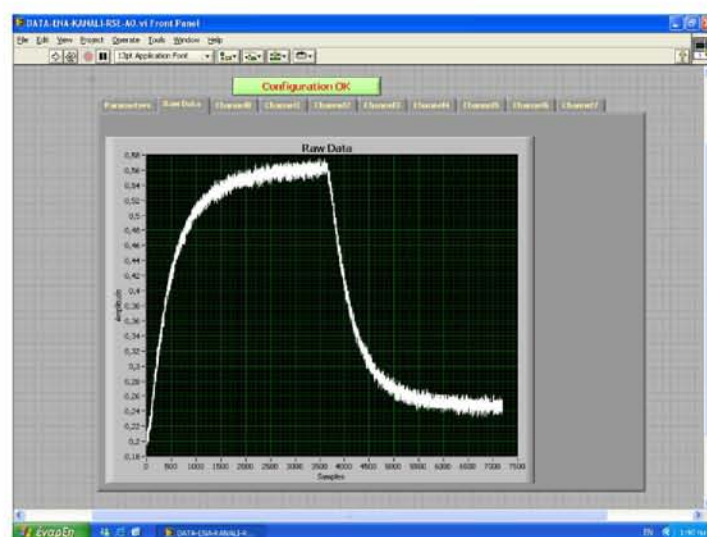
Σχήμα 5.7 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 6 V



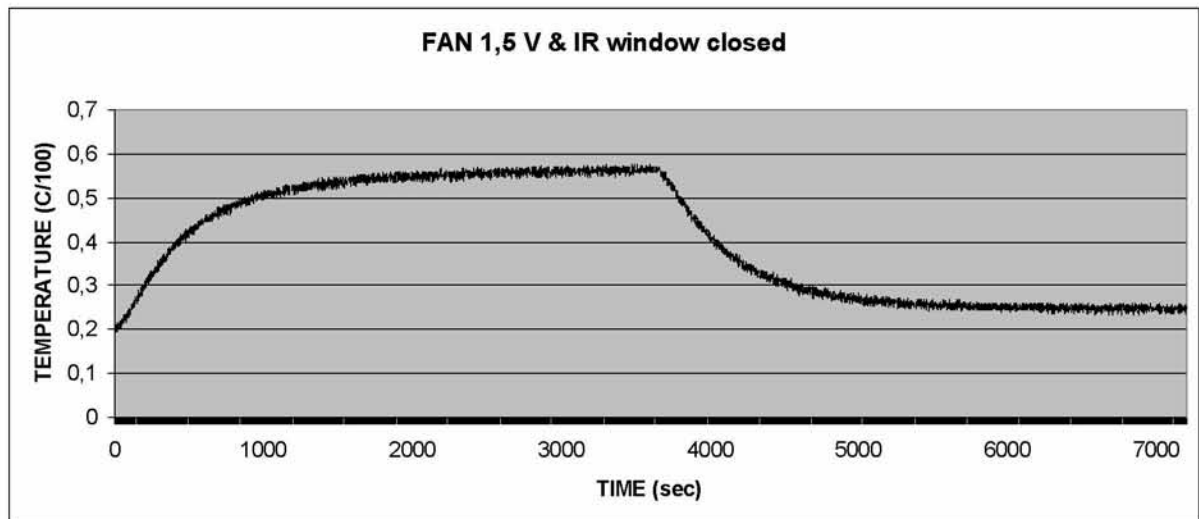
Σχήμα 5.8 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 6 V

Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι η οριακή τιμή της θερμοκρασίας του πυρήνα μετά από 60 λεπτά θέρμανσης έφτασε στους **52,2 βαθμούς Κελσίου**, ενώ μετά από 60 λεπτά ψύξης, η θερμοκρασία του πυρήνα έφτασε οριακά στους **25,3 βαθμούς Κελσίου**.

Στη συνέχεια η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα ετέθη στα 1,5 V και κλείστηκε το παράθυρο όρασης της IR camera, με υαλοβάμβακα πάχους 5 cm. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι θερμοκρασίες συναρτήσει του χρόνου.



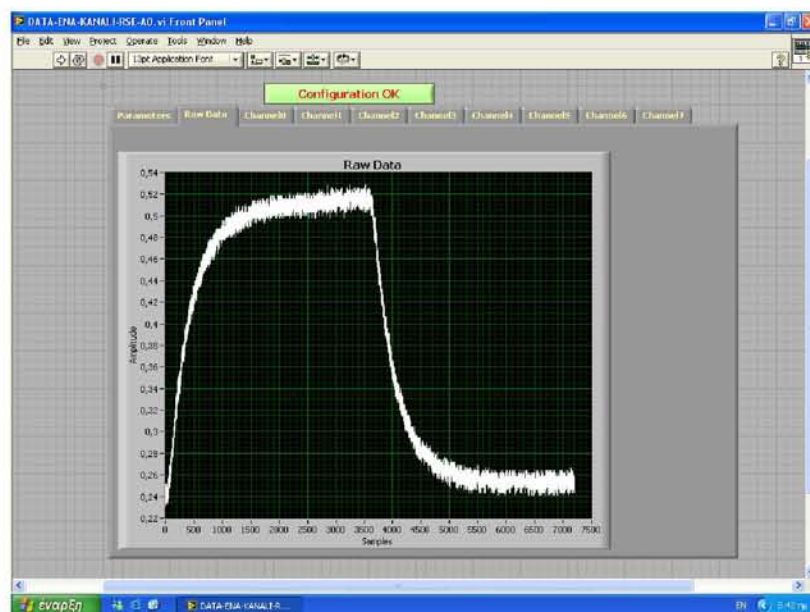
Σχήμα 5.9 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 1,5 V & IR window closed



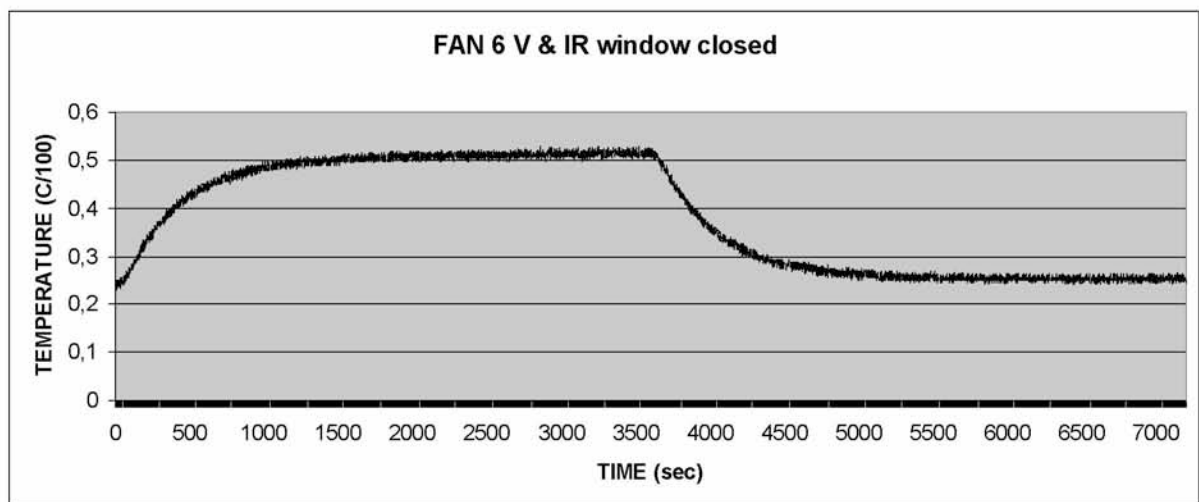
Σχήμα 5.10 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 1,5 V & IR window closed

Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι η οριακή τιμή της θερμοκρασίας του πυρήνα μετά από 3600 sec θέρμανσης έφτασε στους **56,2 βαθμούς Κελσίου**, ενώ μετά από 3600 sec ψύξης, η θερμοκρασία του πυρήνα έφτασε οριακά στους **24,7 βαθμούς Κελσίου**.

Στη συνέχεια η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα ετέθη στα 6 V, ενώ το παράθυρο όρασης της IR camera παρέμεινε κλειστό. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι θερμοκρασίες συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 5.11 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 6 V & IR window closed



Σχήμα 5.12 Θερμοκρασίες στον πυρήνα με FAN στα 6 V & IR window closed

Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι η οριακή τιμή της θερμοκρασίας του πυρήνα μετά από 3600 sec θέρμανσης έφτασε στους **51,5 βαθμούς Κελσίου**, ενώ μετά από 3600 sec ψύξης, η θερμοκρασία του πυρήνα έφτασε οριακά στους **25,3 βαθμούς Κελσίου**.

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις θερμοκρασιών στον πυρήνα εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η οριακή τιμή της θερμοκρασίας του πυρήνα μετά από 1 ώρα θέρμανσης δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή, εκτός από την περίπτωση που η τάση τροφοδοσίας στον πυρήνα ήταν 1,5 V κατά την οποία η θερμοκρασία ανέβηκε περίπου 3 βαθμούς Κελσίου.
- Το κλείσιμο του IR WINDOW επηρέασε ελάχιστα τη θερμοκρασία και αυτό περισσότερο κατά την περίπτωση που η τάση τροφοδοσίας ήταν 1,5 V.
- Σε όλες τις περιπτώσεις η θερμότητα απομακρύνθηκε αποτελεσματικά, σε διαφορετική περίπτωση θα είχαμε ανεξέλεγκτη άνοδο της θερμοκρασίας του πυρήνα.

5.2 Μετρήσεις ταχύτητας αέρα

Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3 της παρούσης, ελήφθησαν 4 ομάδες μετρήσεων ταχύτητας του αέρα κατά την έξοδο του από τα πτερύγια ψύξης, με παράμετρο την τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα. Για τον υπολογισμό της παροχής του αέρα Q που εξέρχεται από τα πτερύγια ψύξης πρέπει να υπολογιστεί το ολοκλήρωμα:

$$Q = \int u dA \quad (5-1)$$

Το οποίο για να υπολογιστεί, χωρίστηκε η διατομή των πτερυγίων ψύξης σε 13 ορθογώνια εμβαδού dA συν 2 ορθογώνια στα άκρα της διατομής, εμβαδού $dA/2$, σύμφωνα με το σχήμα 5.13

$$Q = \sum_{i=1}^{15} u_i dA_i = \sum_{i=2}^{14} u_i b h + \frac{1}{2} b h (u_1 + u_{15}) \quad (5-2)$$



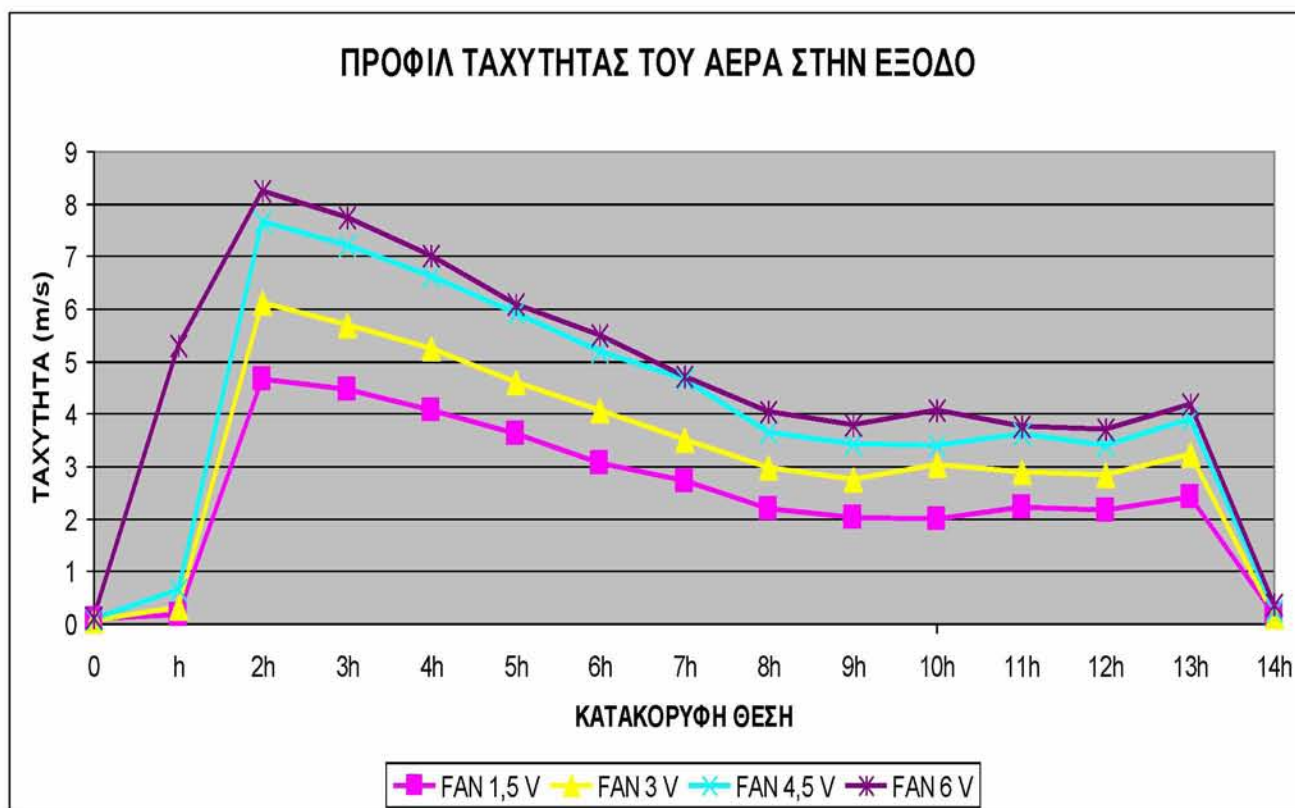
Σχήμα 5.13 Διαχωρισμός της διατομής των πτερυγίων ψύξης σε 14 ορθογώνια

Στο παραπάνω σχήμα διακρίνονται οι θέσεις μέτρησης ταχύτητας με το σύμβολο x , καθώς επίσης το βήμα μεταξύ των μετρήσεων $h=7,2/14$ (cm) και το πλάτος βάσης $b=1,2$ (cm), έτσι ώστε η κάθε μέτρηση να λαμβάνει χώρα στο κέντρο βάρους της κάθε διατομής με εξαίρεση τις μετρήσεις στα άκρα της διατομής.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα σε κάθε κατακόρυφη θέση ξεκινώντας από τη βάση $y=0$, καθώς και ο υπολογισμός της ογκομετρικής παροχής.

h (m)	0,0051428571	b (m)	0,012	
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΘΕΣΗ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΕΡΑ (m/s)			
Y (cm)	FAN 1,5V	FAN 3V	FAN 4,5V	FAN 6V
0,00	0,076	0,061	0,086	0,112
0,51	0,168	0,152	0,645	5,288
1,03	4,648	6,116	7,645	8,255
1,54	4,470	5,690	7,203	7,747
2,06	4,079	5,232	6,624	7,010
2,57	3,607	4,597	5,928	6,081
3,09	3,053	4,079	5,182	5,507
3,60	2,723	3,505	4,648	4,699
4,11	2,184	2,982	3,658	4,039
4,63	2,032	2,743	3,434	3,785
5,14	1,981	3,023	3,393	4,064
5,66	2,210	2,896	3,617	3,754
6,17	2,169	2,845	3,388	3,708
6,69	2,398	3,236	3,886	4,166
7,20	0,168	0,152	0,254	0,356
ΠΑΡΟΧΗ (m³/s)	2,212116461565700E-03	2,913096935724190E-03	3,667266483725160E-03	4,217317267712830E-03
ΠΑΡΟΧΗ (m³/h)	7,96	10,49	13,20	15,18

Η απεικόνιση των παραπάνω μετρήσεων σε κοινό διάγραμμα θέσης-ταχύτητας για κάθε τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, μας δίνει το προφίλ ταχυτήτων του σχήματος 5.14. Για λόγους ευκρίνειας και λειτουργικότητας, ο οριζόντιος άξονας είναι εκπεφρασμένος σε ακέραιες τιμές του βήματος των μετρήσεων h .



Σχήμα 5.14 Προφίλ ταχυτήτων αέρα κατά την έξοδο από τη συσκευή

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα των ταχυτήτων δεν πρόκειται για ομοιόμορφη κατανομή αλλά οι μέγιστες τιμές ταχυτήτων παρατηρούνται στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος και μάλιστα ανεξάρτητα από την τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, γεγονός που εξηγείται από τη γεωμετρία του ανεμιστήρα. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται αυτό που διαισθητικά αναμένονταν, ότι δηλαδή όσο αυξάνεται η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, τόσο μεγαλύτερες ταχύτητες αέρα εμφανίζονται στην έξοδο.

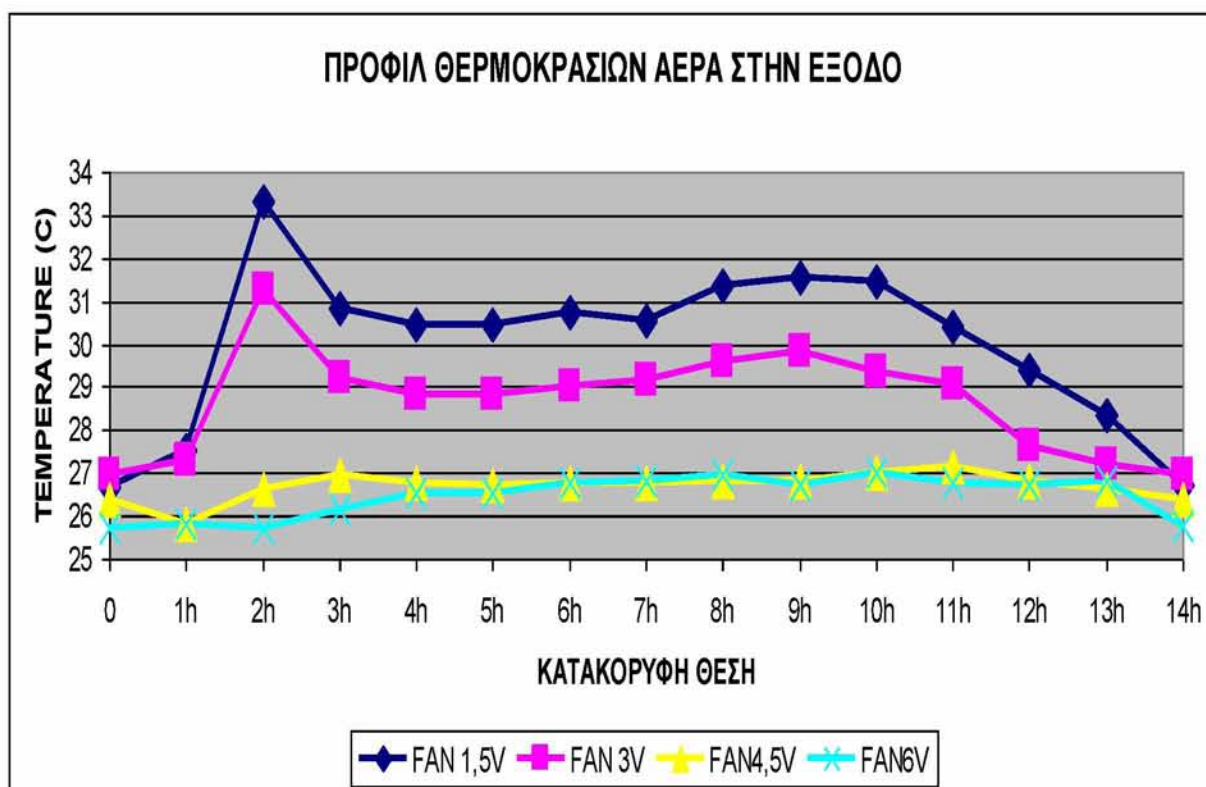
Σε αυτό το σημείο δεν πρέπει να παραλείψουμε να αναφέρουμε ότι παρατηρείται μεγάλη απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων με το θερμο-ανεμόμετρο TSI και το θερμο-ανεμόμετρο ακριβείας, καθώς τα αποτελέσματα της δεύτερης είναι σχεδόν στο 50% των τιμών της πρώτης. Αυτό συμβαίνει διότι το θερμο-ανεμόμετρο της TSI μετράει μέσες τιμές σε κάθε θέση ενώ το θερμο-ανεμόμετρο ακριβείας μετράει τις στιγμιαίες τιμές.

5.3 Μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα

Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε διεξοδικά στο κεφάλαιο 3 της παρούσης, ελήφθησαν 4 ομάδες μετρήσεων θερμοκρασίας του αέρα κατά την έξοδο του από τα πτερύγια ψύξης, με παράμετρο την τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα. Οι μετρήσεις που ελήφθησαν είναι οι ακόλουθες:

ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΘΕΣΗ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ °C			
	FAN 1,5V	FAN 3V	FAN 4,5V	FAN 6V
0	26,67	26,94	26,39	25,72
1h	27,56	27,28	25,83	25,83
2h	33,33	31,28	26,61	25,72
3h	30,83	29,22	26,94	26,17
4h	30,44	28,83	26,78	26,56
5h	30,44	28,83	26,72	26,56
6h	30,72	29,00	26,78	26,78
7h	30,56	29,17	26,78	26,83
8h	31,39	29,61	26,83	26,94
9h	31,56	29,83	26,83	26,72
10h	31,44	29,33	27,00	27,00
11h	30,39	29,06	27,17	26,78
12h	29,39	27,61	26,83	26,72
13h	28,33	27,22	26,61	26,83
14h	26,70	26,96	26,40	25,75

Η απεικόνιση των παραπάνω μετρήσεων σε κοινό διάγραμμα θέσης-θερμοκρασίας για κάθε τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, μας δίνει το θερμοκρασιακό προφίλ του σχήματος 5.15. Για λόγους ευκρίνειας και λειτουργικότητας, ο οριζόντιος άξονας και εδώ είναι εκπεφρασμένος σε ακέραιες τιμές του βήματος των μετρήσεων h.



Σχήμα 5.15 Προφίλ θερμοκρασίας του αέρα κατά την έξοδο.

Όπως διακρίνεται από το παραπάνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται αυτό που διαισθητικά αναμενόταν, ότι δηλαδή όσο αυξάνεται η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα και άρα και η ταχύτητα της ροής, τόσο μικρότερες θερμοκρασίες αέρα εμφανίζονται στην έξοδο. Αυτό συμβαίνει διότι σε μεγαλύτερες ταχύτητες ροής, δεν υπάρχει δυνατότητα αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα τοπικά. Επιπλέον διαπιστώνεται ότι σε τάση τροφοδοσίας 4,5 V και 6V η θερμοκρασία του αέρα διατηρείται σχεδόν σταθερή σε όλο το μήκος της διατομής των πτερυγίων ψύξης και ελάχιστα πιο πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου. Τέλος παρατηρούμε πως στις περιπτώσεις των 1,5 και 3 V τάσης τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, η πλέον επικίνδυνη περιοχή θερμοκρασιακά είναι αυτή που απέχει 2h από τη βάση.

5.4 Υπολογισμός ισχύος εισόδου-εξόδου στη συσκευή

Η ισχύς εισόδου στη συσκευή αποτελεί το άθροισμα της ισχύος του soldering station και της ισχύος του ανεμιστήρα. Η ισχύς του soldering station μετρήθηκε στα 40,2 Watt, ενώ η ισχύς του ανεμιστήρα εξαρτάται από την τάση της τροφοδοσίας του. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ισχύς εισόδου για κάθε περίπτωση τάσης τροφοδοσίας του ανεμιστήρα.

Soldering Station (Watt)	40,2			
FAN Intensity (A)	0,5			
FAN Voltage (Volts)	1,5	3	4,5	6
P_{in} (Watt)	40,95	41,7	42,45	43,2

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων ταχύτητας και θερμοκρασίας του αέρα κατά την έξοδο του από τη διατομή των πτερυγίων ψύξης, συγκεντρώθηκαν σε αρχείο excel όπου και έγινε ο υπολογισμός της ισχύος εξόδου από τη ψήκτρα, με βάση την εξίσωση:

$$P_{out} = \int \rho c_p \Delta u \Delta \theta dA = \sum_{i=1}^{i=15} \rho_i c_p u_i \Delta \theta_i E_i \quad (5-3)$$

όπου ρ_i η πυκνότητα του αέρα στη δεδομένη θερμοκρασία σε $[\frac{kg}{m^3}]$

c_p η ειδική θερμότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση σε $[\frac{J}{Kg^\circ K}]$

Δu η διαφορά ταχυτήτων του αέρα εξόδου-εισόδου σε m/s

u_i η μετρούμενη ταχύτητα στην έξοδο του αέρα από τη συσκευή

$\Delta \theta$ η διαφορά της μετρούμενης θερμοκρασίας αέρα από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

και $E_i = \frac{E_0}{14}$ για $i=2, \dots, 13$ και $E_1 = E_{14} = \frac{1}{2} \frac{E_0}{14}$, όπου E_0 το εμβαδό της διατομής των πτερυγίων

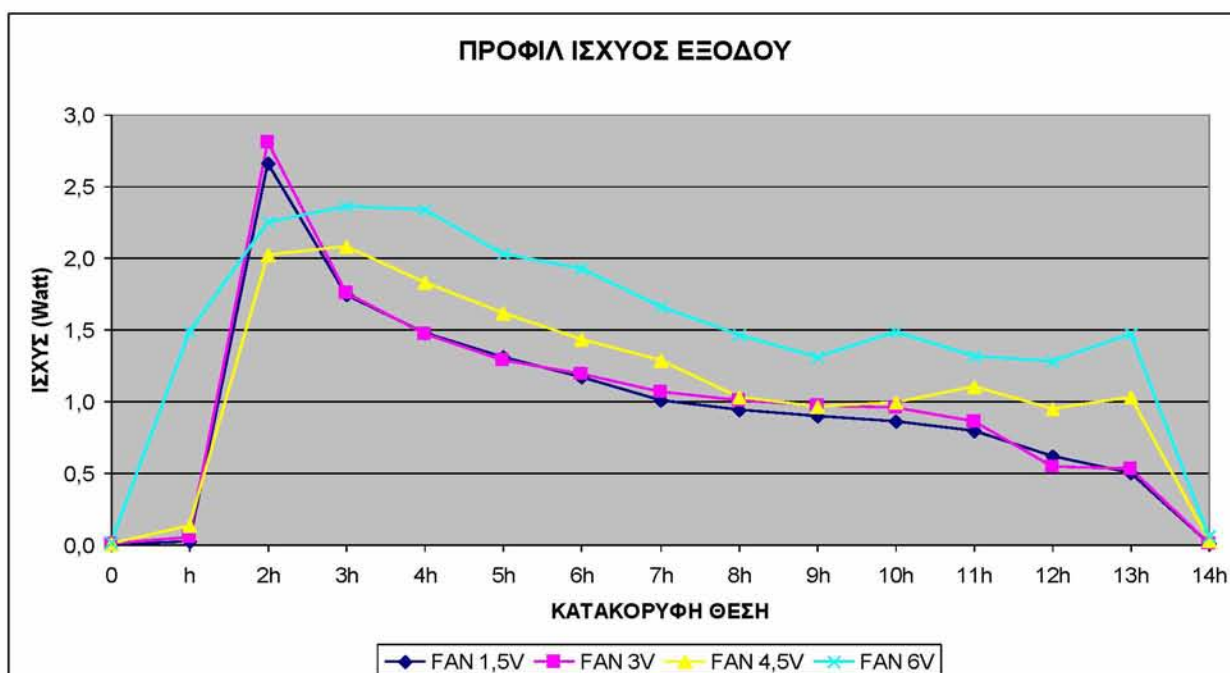
ψύξης, κάθετα στη ροή του αέρα. Επιπλέον θεωρήθηκε ότι ο αέρας εισέρχεται στη συσκευή με μηδενική ταχύτητα.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΑ 1,5V FAN								
Θερμοκρασία περιβάλλοντος						25,5		
E ₀ (m ²)						8,64E-04		
α/α	Υ (cm)	U (m/s)	T (°C)	T (°k)	ΔT (°k)	ρ (Kg/m ³)	C _p (J/kg°k)	P _i
1	0,00	0,08	26,67	299,82	1,17	1,18	1007,00	0,003
2	0,52	0,17	27,56	300,71	2,06	1,18	1007,00	0,025
3	1,03	4,65	33,33	306,48	7,83	1,18	1007,00	2,665
4	1,55	4,47	30,83	303,98	5,33	1,18	1007,00	1,745
5	2,06	4,08	30,44	303,59	4,94	1,18	1007,00	1,476
6	2,58	3,61	30,44	303,59	4,94	1,18	1007,00	1,305
7	3,09	3,05	30,72	303,87	5,22	1,18	1007,00	1,167
8	3,61	2,72	30,56	303,71	5,06	1,18	1007,00	1,008
9	4,12	2,18	31,39	304,54	5,89	1,18	1007,00	0,941
10	4,64	2,03	31,56	304,71	6,06	1,18	1007,00	0,901
11	5,15	1,98	31,44	304,59	5,94	1,18	1007,00	0,862
12	5,67	2,21	30,39	303,54	4,89	1,18	1007,00	0,791
13	6,18	2,17	29,39	302,54	3,89	1,18	1007,00	0,617
14	6,70	2,40	28,33	301,48	2,83	1,18	1007,00	0,497
15	7,21	0,17	26,60	299,75	1,10	1,18	1007,00	0,007
ΣP _i (Watt)								14,01

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΑ 3V FAN								
Θερμοκρασία περιβάλλοντος						25		
E ₀ (m ²)						8,64E-04		
α/α	Υ (cm)	U (m/s)	T (°C)	T (°k)	ΔT (°k)	ρ (Kg/m ³)	C _p (J/kg°k)	P _i
1	0,000	0,061	26,944	300,094	1,944	1,178	1007,000	0,004
2	0,515	0,305	27,278	300,428	2,278	1,178	1007,000	0,051
3	1,030	6,116	31,278	304,428	6,278	1,178	1007,000	2,810
4	1,545	5,690	29,222	302,372	4,222	1,178	1007,000	1,758
5	2,060	5,232	28,833	301,983	3,833	1,178	1007,000	1,468
6	2,575	4,597	28,833	301,983	3,833	1,178	1007,000	1,290
7	3,090	4,079	29,000	302,150	4,000	1,178	1007,000	1,194
8	3,605	3,505	29,167	302,317	4,167	1,178	1007,000	1,069
9	4,120	2,982	29,611	302,761	4,611	1,178	1007,000	1,006
10	4,635	2,743	29,833	302,983	4,833	1,178	1007,000	0,970
11	5,150	3,023	29,333	302,483	4,333	1,178	1007,000	0,959
12	5,665	2,896	29,056	302,206	4,056	1,178	1007,000	0,859
13	6,180	2,845	27,611	300,761	2,611	1,178	1007,000	0,544
14	6,695	3,236	27,222	300,372	2,222	1,178	1007,000	0,526
15	7,210	0,152	26,939	300,089	1,939	1,178	1007,000	0,011
ΣP _i (Watt)								14,52

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΑ 4,5V FAN								
Θερμοκρασία περιβάλλοντος						23		
E ₀ (m ²)						8,64E-04		
α/α	Υ (cm)	U (m/s)	T (°C)	T (°K)	ΔT (°K)	ρ (Kg/m ³)	C _p (J/kg°K)	P _i
1	0,000	0,086	26,389	299,539	3,389	1,178	1007,000	0,011
2	0,515	0,645	25,833	298,983	2,833	1,178	1007,000	0,134
3	1,030	7,645	26,611	299,761	3,611	1,178	1007,000	2,021
4	1,545	7,203	26,944	300,094	3,944	1,178	1007,000	2,080
5	2,060	6,624	26,778	299,928	3,778	1,178	1007,000	1,832
6	2,575	5,928	26,722	299,872	3,722	1,178	1007,000	1,615
7	3,090	5,182	26,778	299,928	3,778	1,178	1007,000	1,433
8	3,605	4,648	26,778	299,928	3,778	1,178	1007,000	1,285
9	4,120	3,658	26,833	299,983	3,833	1,178	1007,000	1,026
10	4,635	3,434	26,833	299,983	3,833	1,178	1007,000	0,963
11	5,150	3,393	27,000	300,150	4,000	1,178	1007,000	0,993
12	5,665	3,617	27,167	300,317	4,167	1,178	1007,000	1,103
13	6,180	3,388	26,833	299,983	3,833	1,178	1007,000	0,951
14	6,695	3,886	26,611	299,761	3,611	1,178	1007,000	1,027
15	7,210	0,254	26,390	299,540	3,390	1,178	1007,000	0,032
ΣP _i (Watt)								16,50

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΑ 6V FAN								
Θερμοκρασία περιβάλλοντος						22		
E ₀ (m ²)						8,64E-04		
α/α	Υ (cm)	U (m/s)	T (°C)	T (°K)	ΔT (°K)	ρ (Kg/m ³)	C _p (J/kg°K)	P _i
1	0,000	0,112	25,722	298,872	3,722	1,178	1007,000	0,015
2	0,515	5,288	25,833	298,983	3,833	1,178	1007,000	1,484
3	1,030	8,255	25,722	298,872	3,722	1,178	1007,000	2,249
4	1,545	7,747	26,167	299,317	4,167	1,178	1007,000	2,363
5	2,060	7,010	26,556	299,706	4,556	1,178	1007,000	2,337
6	2,575	6,081	26,556	299,706	4,556	1,178	1007,000	2,027
7	3,090	5,507	26,778	299,928	4,778	1,178	1007,000	1,926
8	3,605	4,699	26,833	299,983	4,833	1,178	1007,000	1,662
9	4,120	4,039	26,944	300,094	4,944	1,178	1007,000	1,461
10	4,635	3,785	26,722	299,872	4,722	1,178	1007,000	1,308
11	5,150	4,064	27,000	300,150	5,000	1,178	1007,000	1,487
12	5,665	3,754	26,778	299,928	4,778	1,178	1007,000	1,313
13	6,180	3,708	26,722	299,872	4,722	1,178	1007,000	1,282
14	6,695	4,166	26,833	299,983	4,833	1,178	1007,000	1,474
15	7,210	0,356	26,732	299,882	4,732	1,178	1007,000	0,062
ΣP _i (Watt)								22,45



Σχήμα 5.16 Κατανομή της ισχύος εξόδου στη διατομή των πτερυγίων ψύξης

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η μετρούμενη ισχύς σε κάθε θέση, για τις διάφορες τιμές της τάσης τροφοδοσίας του ανεμιστήρα. Σε αυτό το σημείο μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό της ισχύος που εξέρχεται της συσκευής σε σχέση με την ισχύ εισόδου.

	FAN VOLTS			
	1,5	3	4,5	6
P_{in} (W)	40,95	41,70	42,45	43,20
P_{out} (W)	14,01	14,52	16,50	22,45
P_{out}/P_{in}	0,34	0,35	0,39	0,52

Από τη μελέτη των παραπάνω υπολογισμών της ισχύος εισόδου και εξόδου, της συσκευής προκύπτουν τα εξής:

- Η ισχύς που εξέρχεται της συσκευής αυξάνεται με την αύξηση της τάσης τροφοδοσίας του ανεμιστήρα.
- Όπως στην περίπτωση της θερμοκρασίας του αέρα, έτσι και εδώ, φαίνεται πως η περιοχή γύρω από το σημείο σε απόσταση 2h από τη βάση,

συνεισφέρει τα μέγιστα στην απαγωγή της θερμότητας, οπότε χρίζει ιδιαίτερης προσοχής.

- Το ποσοστό της εξερχόμενης προς την εισερχόμενη ισχύ, αυξάνεται καθώς αυξάνεται η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα.
- Το ποσοστό της εξερχόμενης προς την εισερχόμενη ισχύ μόνο σε μια περίπτωση (FAN 6V) ήταν μεγαλύτερο του 50%. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις η περισσότερη από την ισχύ που εισέρχεται στη συσκευή είτε αποθηκεύεται είτε εξέρχεται με μη μετρήσιμους μηχανισμούς, όπως πχ απώλειες θερμότητας από το περίβλημα της συσκευής, απώλειες θερμότητας από το στέλεχος του soldering station, απώλεια θερμότητας μέσω ακτινοβολίας από το heat pipe κτλ.

5.5 Μετρήσεις θερμοκρασιών με θερμόμετρο IR χειρός

Προκειμένου να αποκτήσουμε μια πρώτη εικόνα του θερμοκρασιακού πεδίου κατά μήκος του αγωγού θερμότητας, ελήφθησαν δειγματοληπτικά κάθε 15 λεπτά της ώρας θερμοκρασίες σε τρία σημεία επάνω στο heat pipe και πιο συγκεκριμένα στο τμήμα του εξαερωτήρα, του συμπυκνωτή και στο αδιαβατικό τμήμα, τόσο κατά τη διάρκεια της θέρμανσης όσο και της ψύξης. Η παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα.

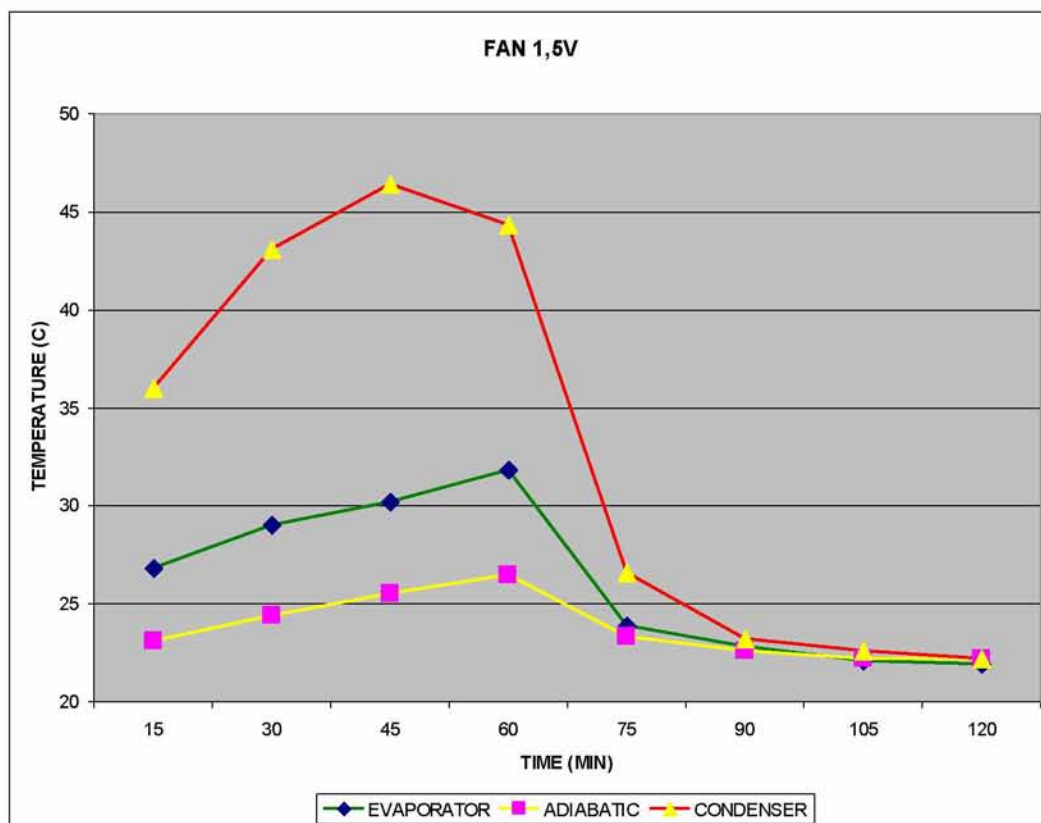
		TEMPERATURE °C			FAN 1,5V
	MINUTE	EVAPORATOR	ADIABATIC	CONDENSER	
HEATING	15	26,8	23,1	36	
	30	29	24,4	43,1	
	45	30,2	25,5	46,4	
	60	31,8	26,5	44,3	
COOLING	75	23,9	23,3	26,6	
	90	22,8	22,6	23,2	
	105	22,1	22,2	22,6	
	120	21,9	22,2	22,2	

	MINUTE	TEMPERATURE °C			FAN 3V
		EVAPORATOR	ADIABATIC	CONDENSER	
HEATING	15	25,1	23,6	38,9	
	30	27,6	25	41	
	45	26	23,7	42	
	60	27,2	24,6	41,2	
COOLING	75	23,9	23	25,7	
	90	22,7	22,6	23,3	
	105	23	22,9	23,1	
	120	22,4	22,4	22,7	

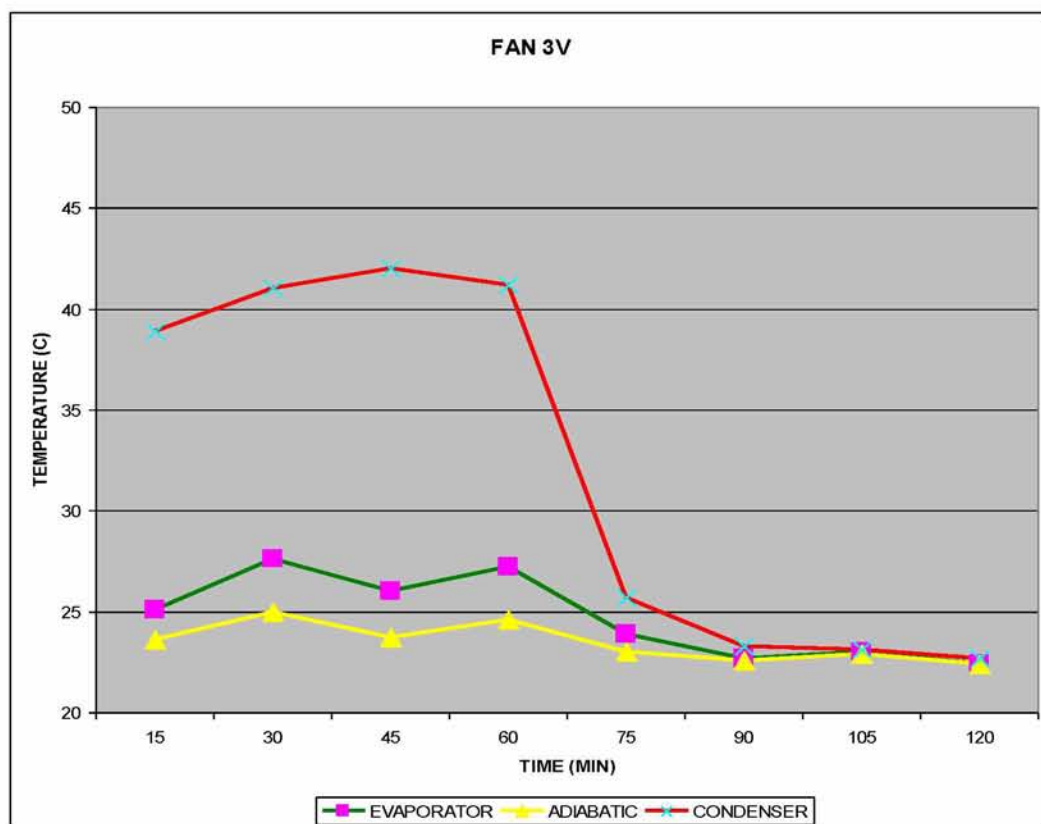
	MINUTE	TEMPERATURE °C			FAN 4,5V
		EVAPORATOR	ADIABATIC	CONDENSER	
HEATING	15	25,1	25,2	30,5	
	30	27,1	25,7	30,7	
	45	25,1	25,1	29,1	
	60	26	25,5	30,6	
COOLING	75	25	24,6	25,7	
	90	24,8	24,7	24,8	
	105	24,3	24,1	24,2	
	120	24,3	24,3	24,3	

	MINUTE	TEMPERATURE °C			FAN 6V
		EVAPORATOR	ADIABATIC	CONDENSER	
HEATING	15	27	27,2	35,2	
	30	26,1	26,7	39,1	
	45	25,8	26,7	36,6	
	60	27	26,3	37,8	
COOLING	75	26,6	26,6	30,9	
	90	25,1	25,2	25,7	
	105	24,3	24,3	24,4	
	120	23,7	23,7	23,7	

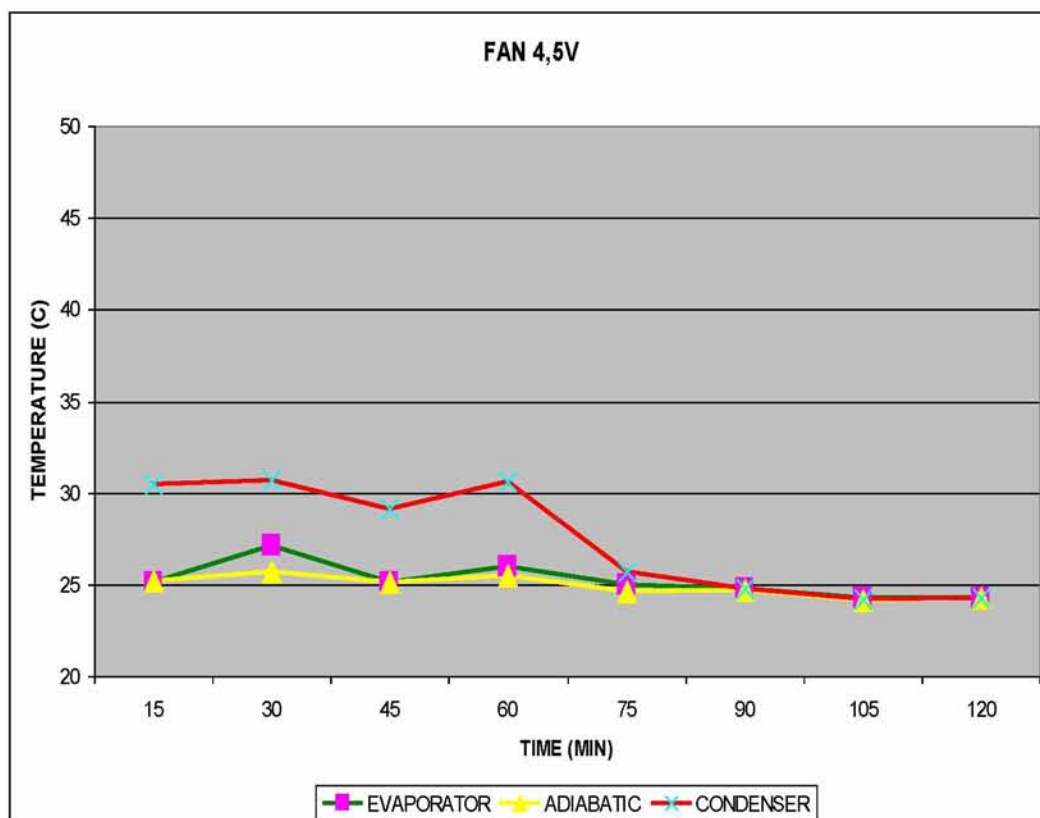
Στη συνέχεια τα παραπάνω αποτελέσματα απεικονίστηκαν σε τέσσερα διαγράμματα, ανάλογα με την τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου excel.



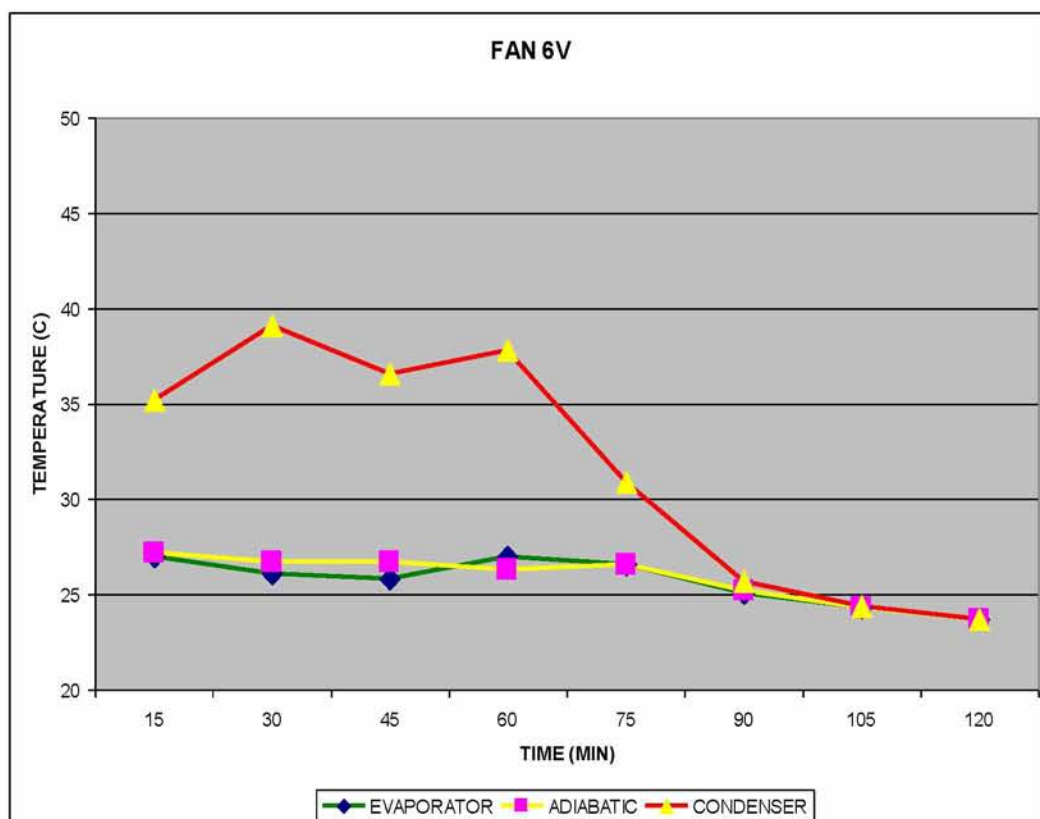
Σχήμα 5.17 θερμοκρασίες στα τρία σημεία για 60' θέρμανση και 60' ψύξη



Σχήμα 5.18 θερμοκρασίες στα τρία σημεία για 60' θέρμανση και 60' ψύξη



Σχήμα 5.19 θερμοκρασίες στα τρία σημεία για 60' θέρμανση και 60' ψύξη



Σχήμα 5.20 θερμοκρασίες στα τρία σημεία για 60' θέρμανση και 60' ψύξη

Από τη μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων προκύπτουν τα εξής:

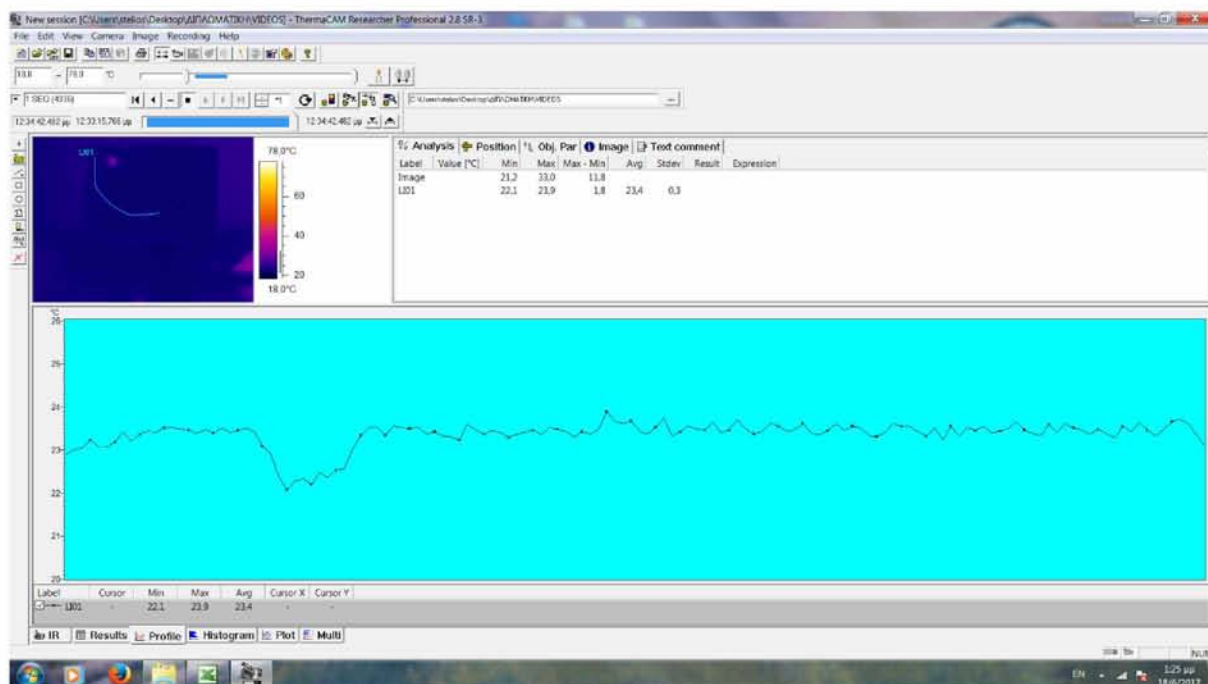
- Η θερμοκρασία στο συμπτυκνωτή είναι σταθερά η μεγαλύτερη και ανεξάρτητα από την τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα.
- Ο εξαερωτήρας είναι σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από το αδιαβατικό τμήμα στις περιπτώσεις των 1,5 V και 3V, ενώ στις άλλες δυο δεν έχει σημαντική διαφορά.
- Η τάση τροφοδοσίας των 4,5 V φαίνεται πως είναι η πλέον αποδοτική, καθώς η μέγιστη θερμοκρασία δεν ξεπέρασε τους 31 βαθμούς κελσίου.
- Η διαφορά θερμοκρασίας συμπτυκνωτή-αδιαβατικού τμήματος, μετά από 45 λεπτά θέρμανσης, ανήλθε στους 20 βαθμούς κελσίου, γεγονός που εγείρει ερωτηματικά τόσο για τη μεθοδολογία, όσο και για την αξιοπιστία της συγκεκριμένης μέτρησης (βλ. σχήματα 5.16 & 5.17).
- Μετά και τα αποτελέσματα της μελέτης με τη θερμική κάμερα FLIR, θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

5.6 Πλήρης απεικόνιση θερμοκρασιακού πεδίου

Για την πλήρη απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τρεις διαφορετικές μεταξύ τους προσεγγίσεις α) της "κεντρικής γραμμής" β) των "τριών περιοχών" και γ) των "τριών σημείων" σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε διεξοδικά στην παράγραφο 3.5.

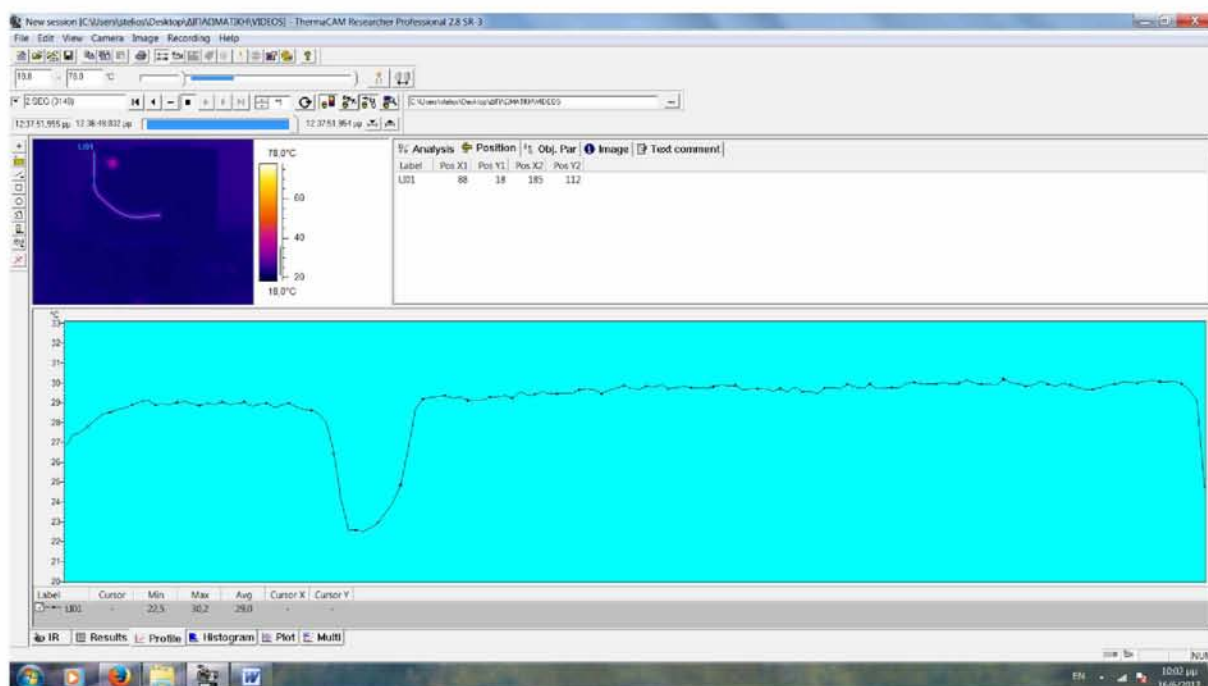
5.6.1 Ανάλυση με βάση τη κεντρική γραμμή

Οι εικόνες που ακολουθούν αποτελούν στιγμιότυπα από τα δεκαεννέα συνολικά βίντεο που αποθηκεύτηκαν σε H/Y. Το κάθε στιγμιότυπο περιγράφει το θερμοκρασιακό προφίλ κατά μήκος του αγωγού και τραβήχτηκε κατά το πέρας βιντεοσκόπησης του εκάστοτε βίντεο, ενώ στο πεδίο της λεζάντας για κάθε στιγμιότυπο αναφέρεται και ο χρόνος από την έναρξη της βιντεοσκόπησης.



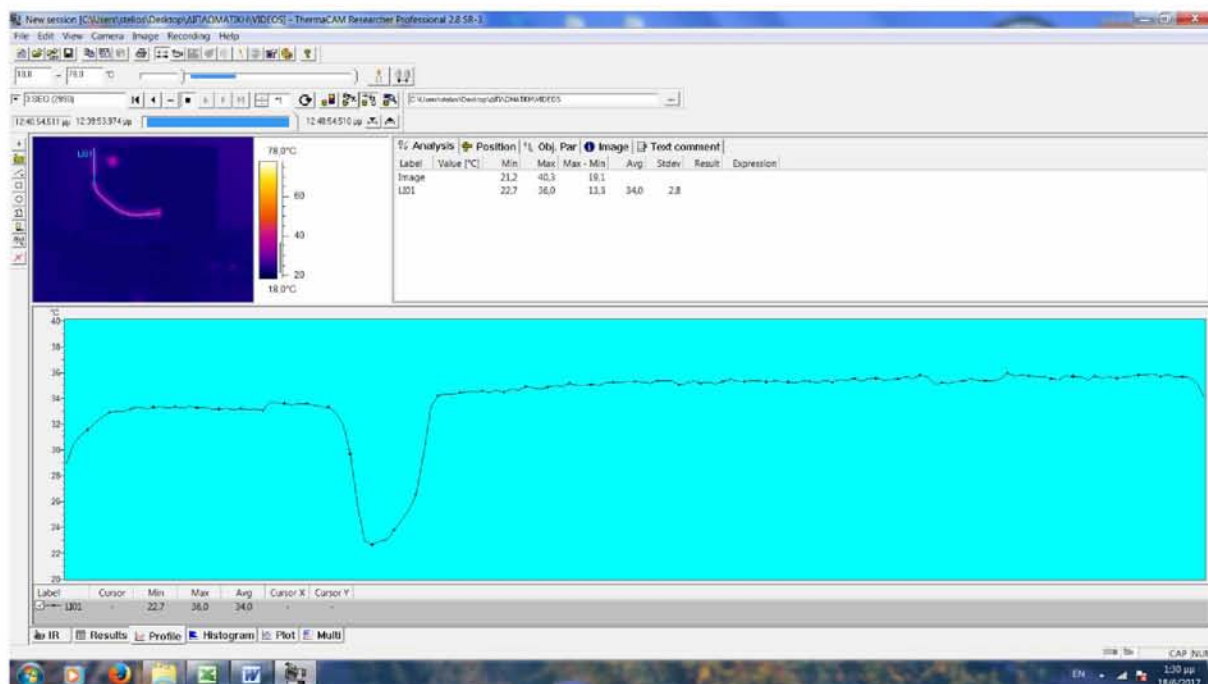
Σχήμα 5.21 στιγμιότυπο στα 87 sec

όπως διακρίνεται στα στιγμιότυπα που ακολουθούν η θερμοκρασία αυξάνεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του αγωγού.

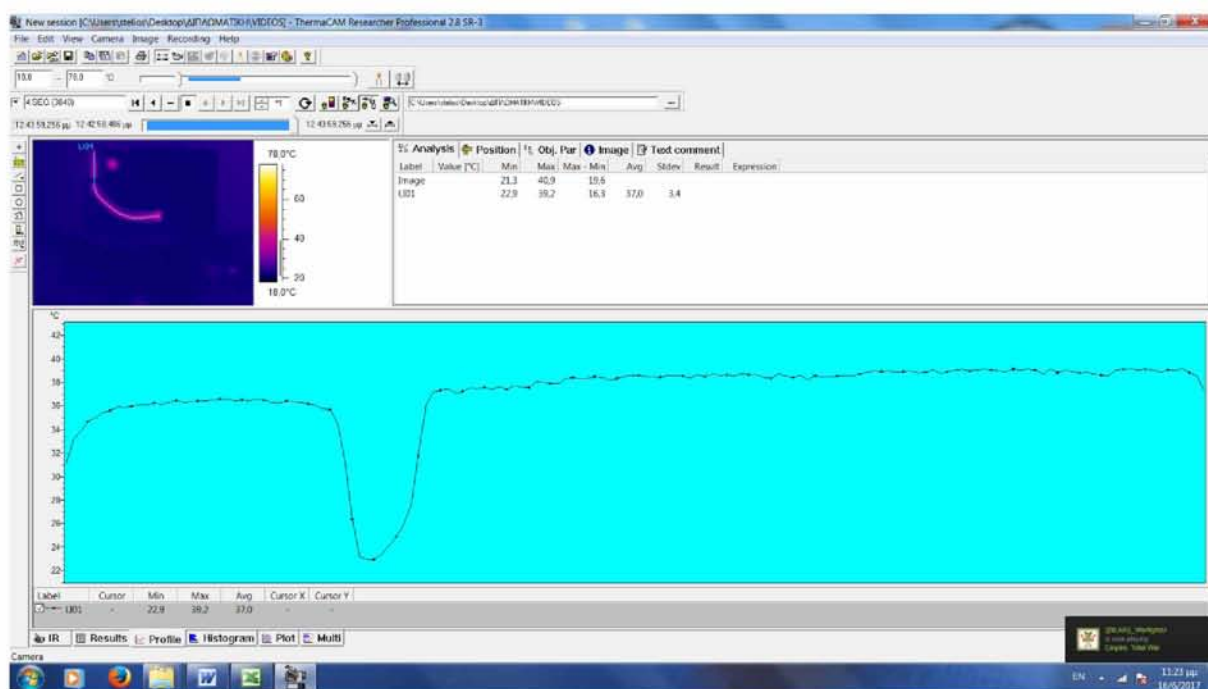


Σχήμα 5.22 στιγμιότυπο στα 276 sec

Η περιοχή έντονης πτώσης της θερμοκρασίας είναι ένα κομμάτι κόντρα πλακέ που αποτελεί βάση στήριξης του ανεμιστήρα, το οποίο βρίσκεται μπροστά από το heat pipe.

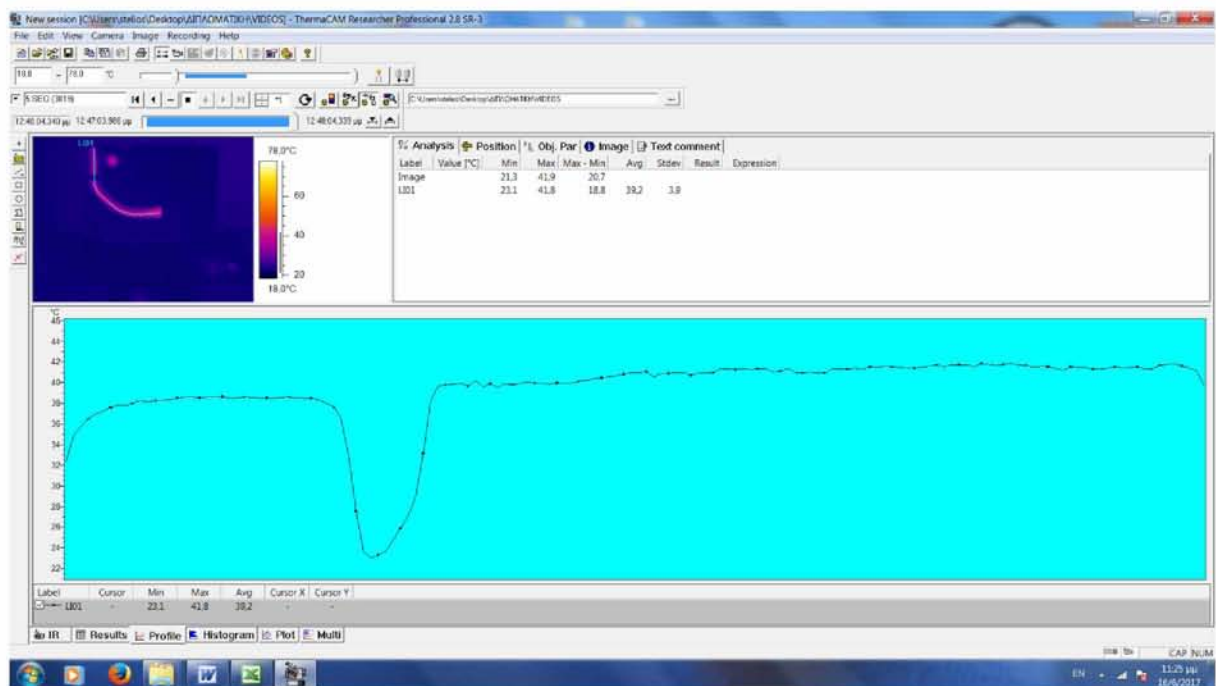


Σχήμα 5.23 στιγμιότυπο στα 459 sec

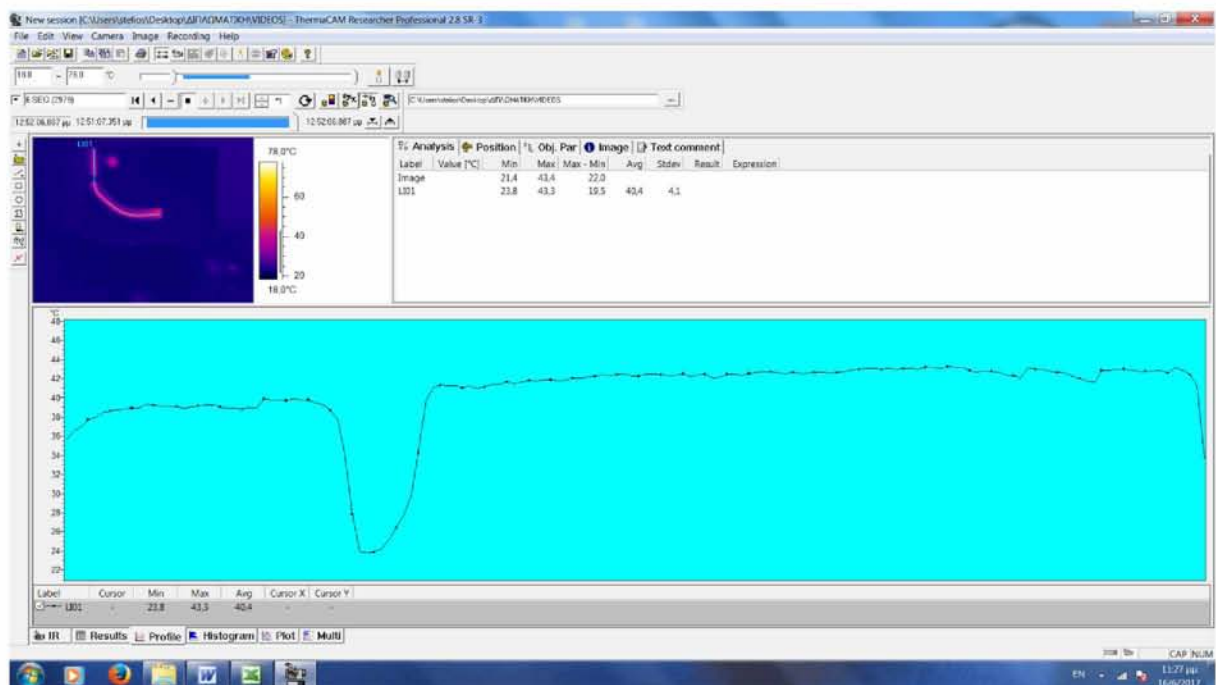


Σχήμα 5.24 στιγμιότυπο στα 644 sec

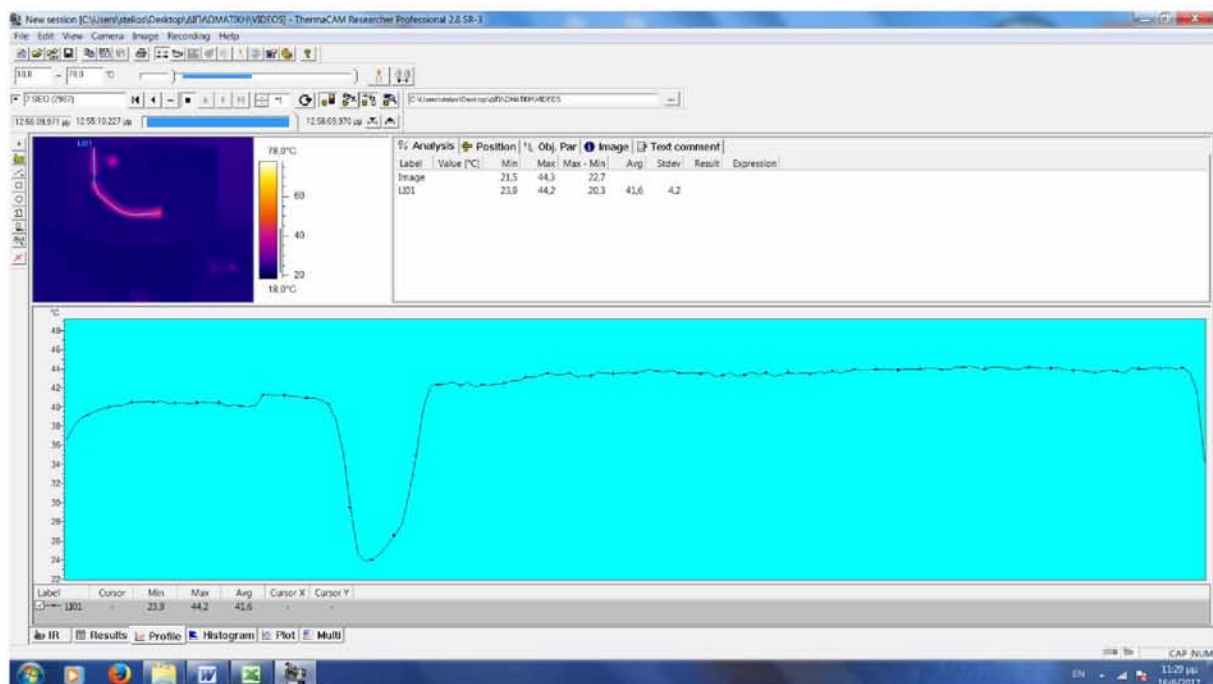
Στα παραπάνω στιγμιότυπα βλέπουμε πως η θερμοκρασία αυξάνεται τόσο από τη μια άκρη του heat pipe στην άλλη, όσο και με την πάροδο του χρόνου. Η διαφορά θερμοκρασίας κατά μήκος του heat pipe, ωστόσο δεν υπερβαίνει τους 3 βαθμούς κελσίου.



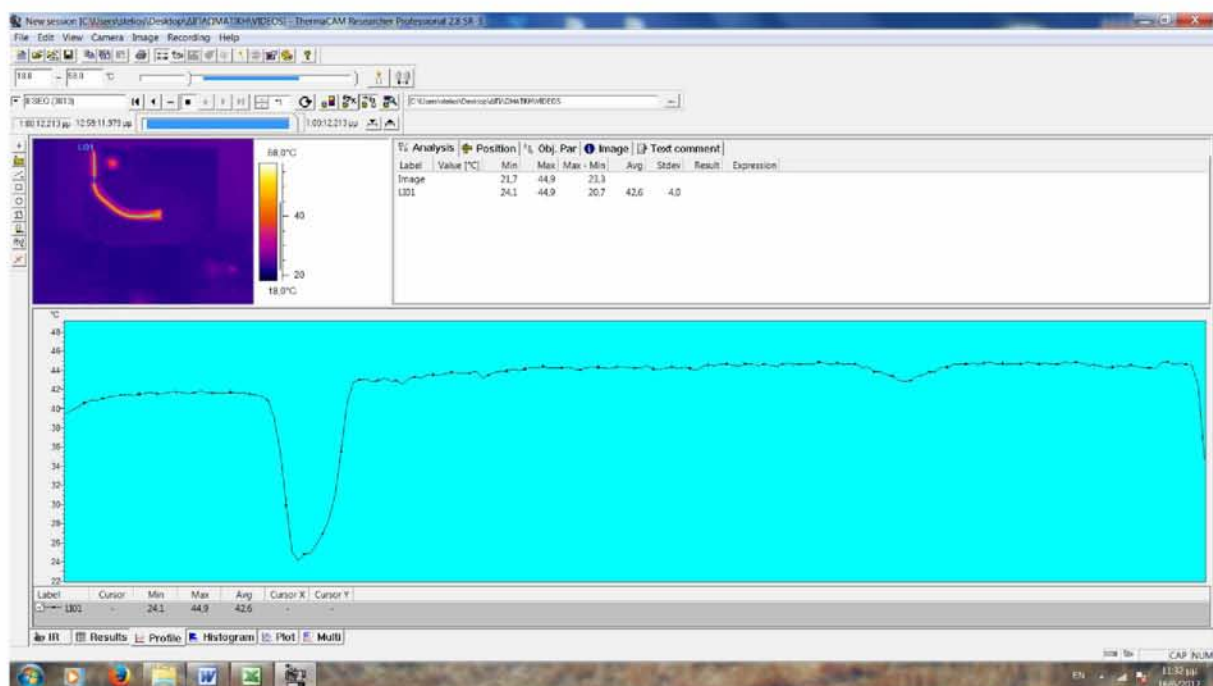
Σχήμα 5.25 στιγμιότυπο στα 889 sec



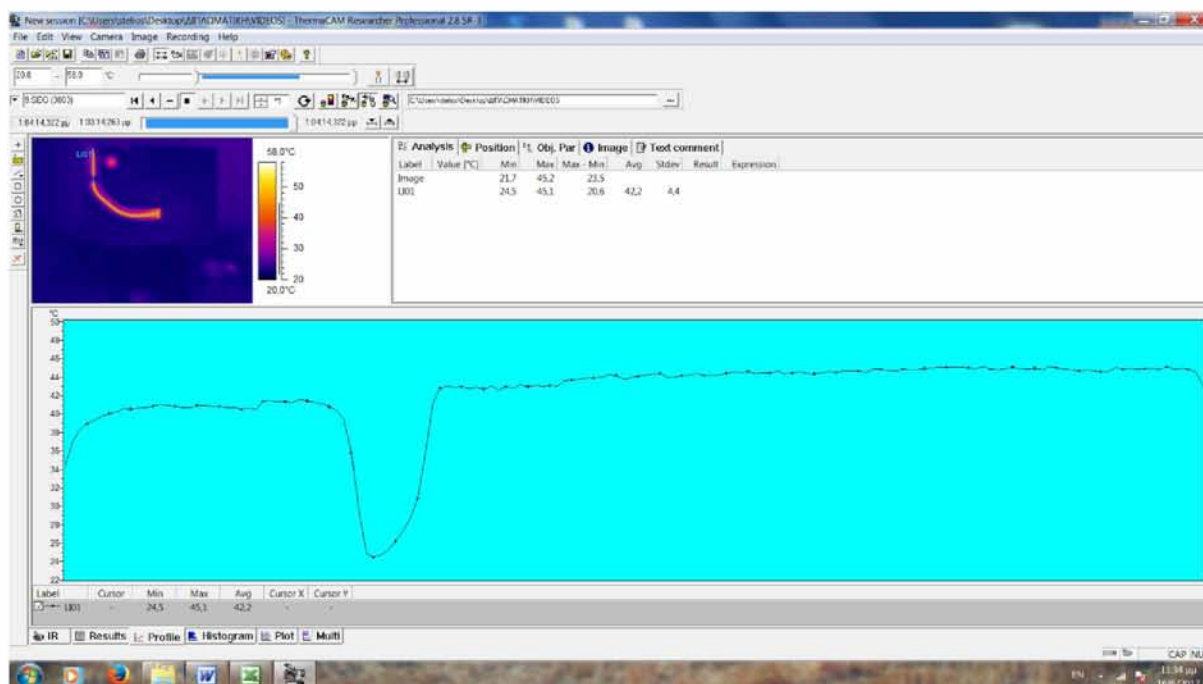
Σχήμα 5.26 στιγμιότυπο στα 1131 sec



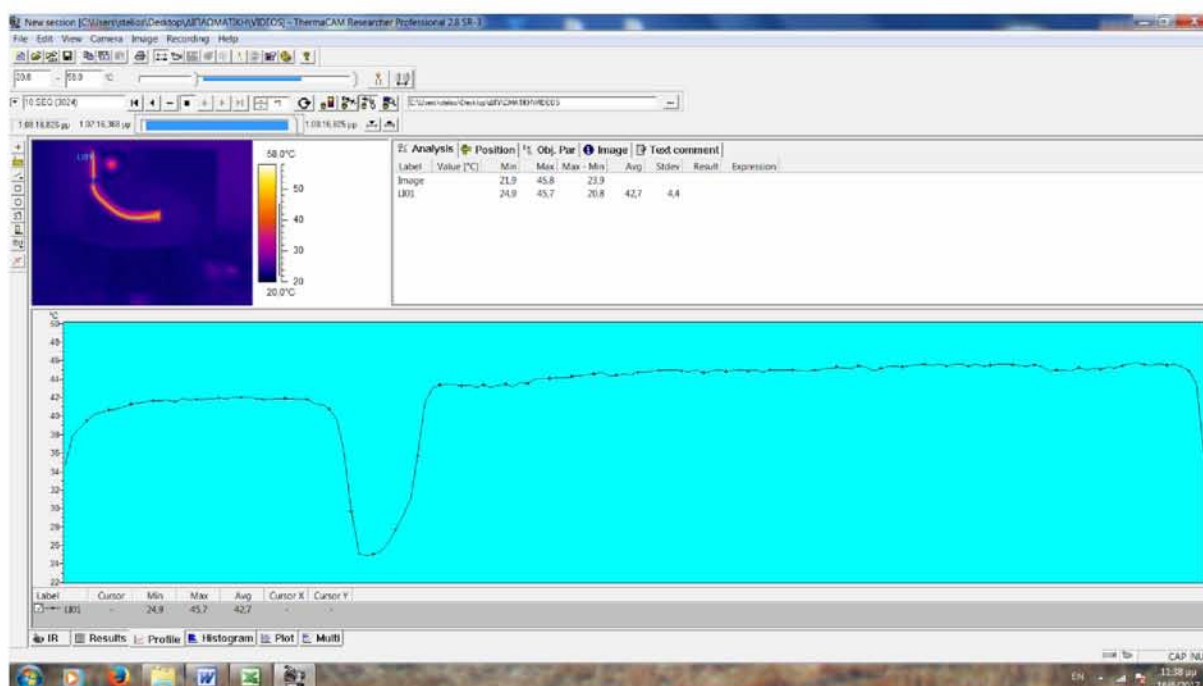
Σχήμα 5.27 στιγμιότυπο στα 1374 sec



Σχήμα 5.28 στιγμιότυπο στα 1617 sec

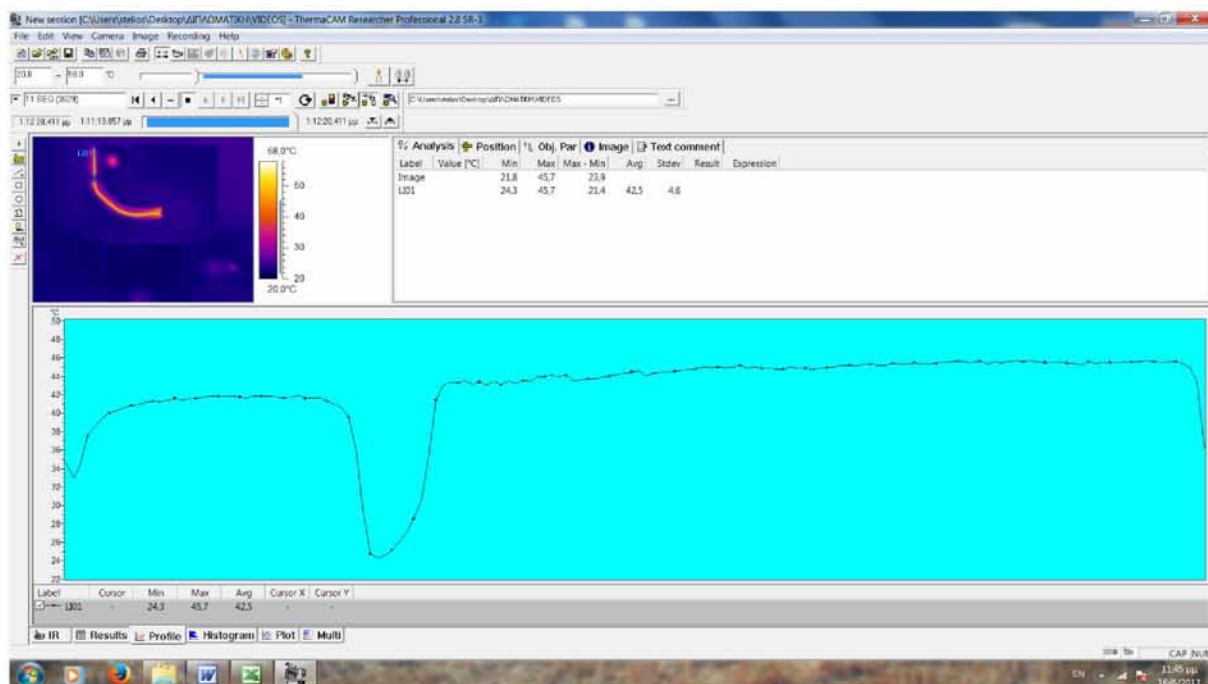


Σχήμα 5.29 στιγμιότυπο στα 1859 sec

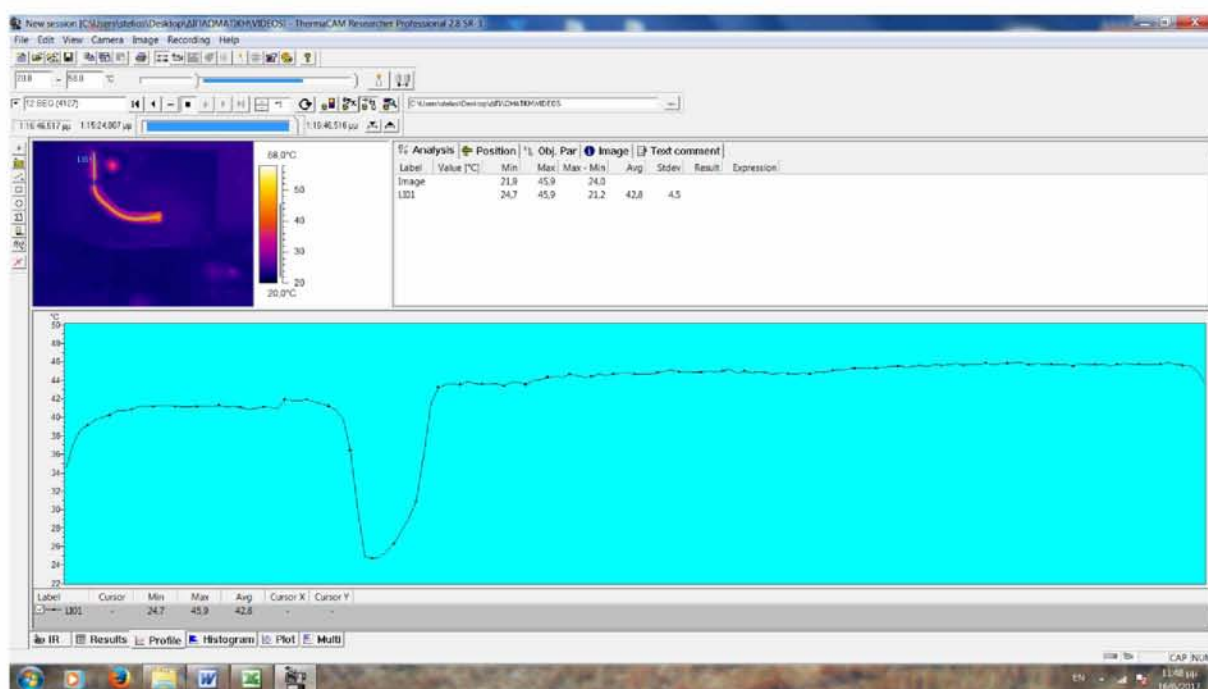


Σχήμα 5.30 στιγμιότυπο στα 2101 sec

Από τα παραπάνω στιγμιότυπα βλέπουμε πως το heat pipe έχει φτάσει σε μόνιμο φαινόμενο, καθώς δε μεταβάλλονται χρονικά πλέον οι θερμοκρασίες, παρά μόνο από τη μια άκρη στην άλλη.



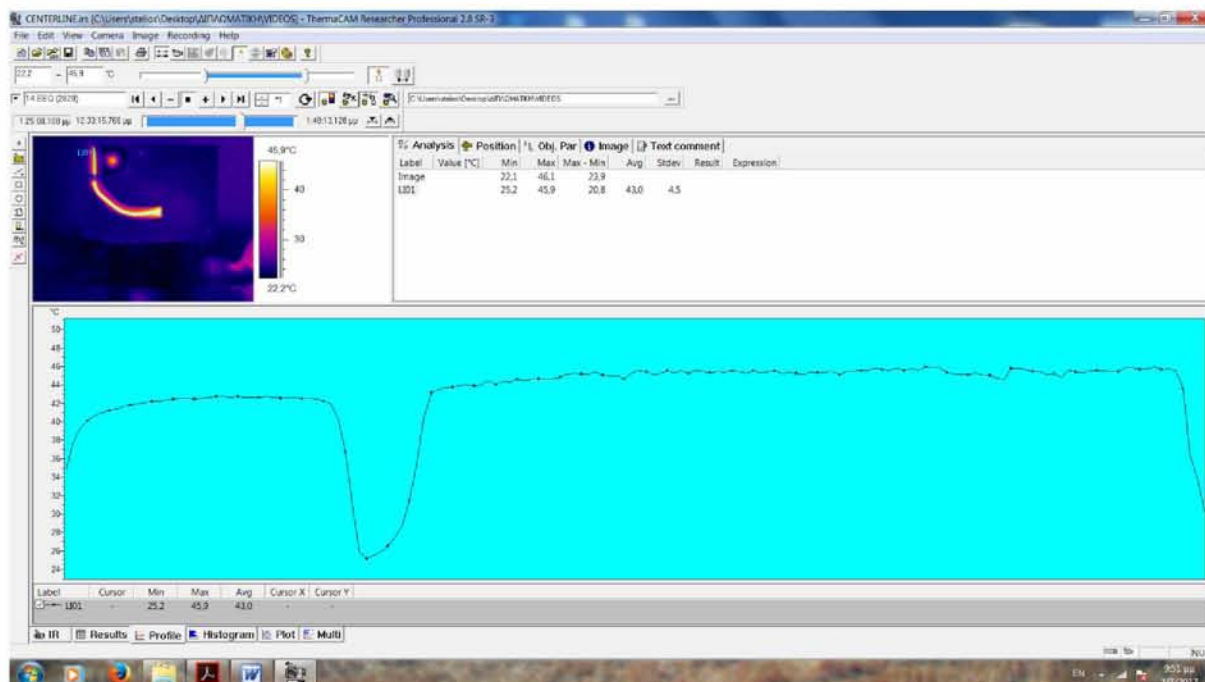
Σχήμα 5.31 στιγμιότυπο στα 2345 sec



Σχήμα 5.32 στιγμιότυπο στα 2611 sec

Σε αυτή τη φάση, το heat pipe βρίσκεται σε μόνιμο φαινόμενο, η διαφορά θερμοκρασίας κατά μήκος του είναι περίπου 4 βαθμοί κελσίου, με τη μέγιστη θερμοκρασία

να εντοπίζεται στο τμήμα του εξαερωτήρα και όχι του συμπυκνωτή όπως είδαμε στην παράγραφο 5.5

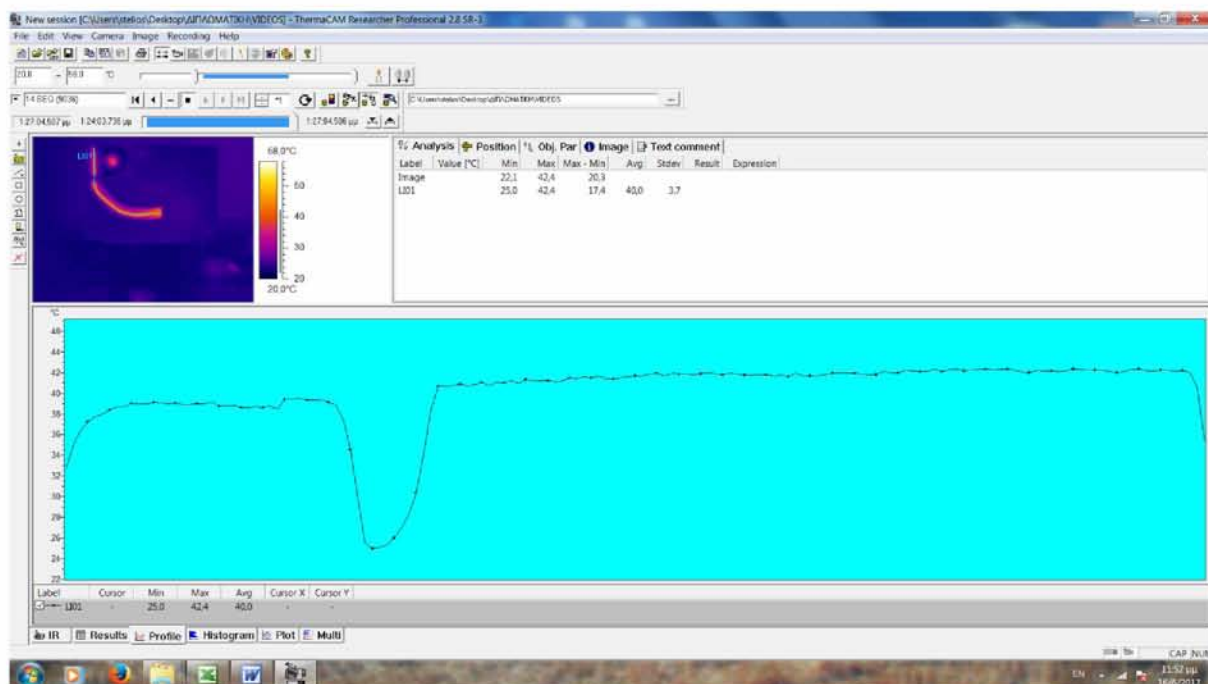


Σχήμα 5.33 στιγμιότυπο στα 3105 sec

Στο παραπάνω στιγμιότυπο αποτυπώνεται η μέγιστη θερμοκρασία κατά το μόνιμο φαινόμενο. Διακρίνεται μια ξεκάθαρη τάση της θερμοκρασίας προς τα δεξιά, το οποίο ερμηνεύεται πως κατά τη θέρμανση του αγωγού ο εξαερωτήρας βρίσκεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από το συμπυκνωτή κατά περίπου 4 βαθμούς κελσίου.

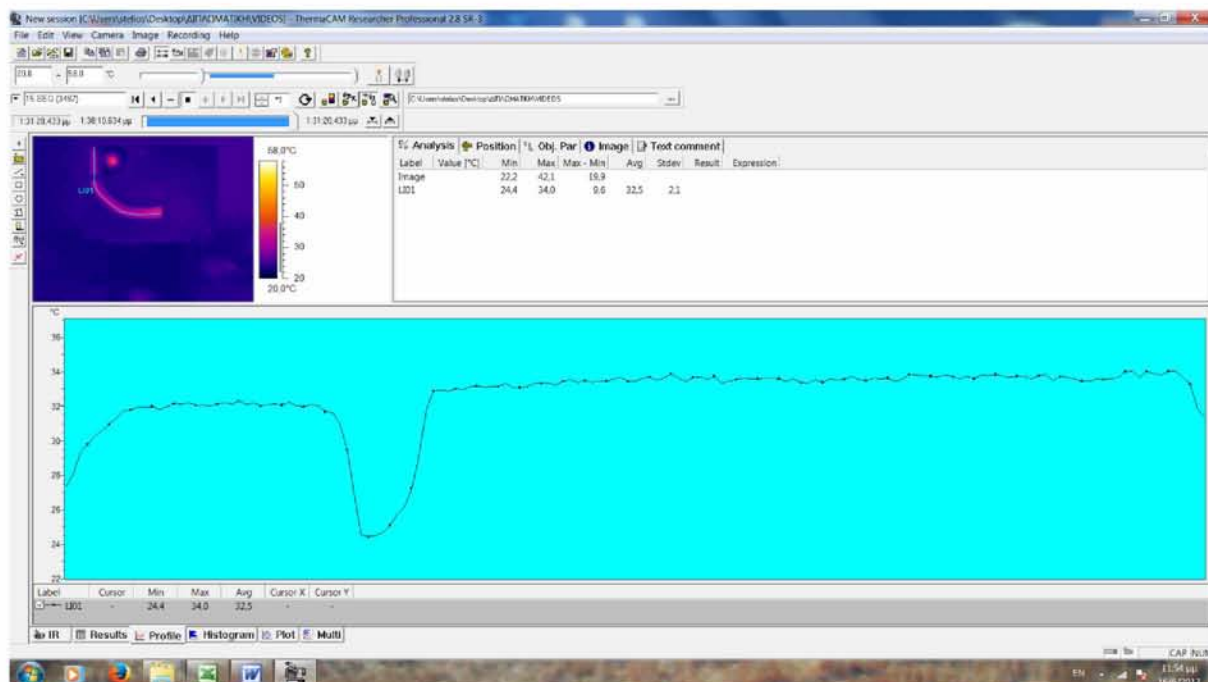
Ο διακόπτης του soldering Station ετέθη σε θέση OFF στις 13:25:00 δηλαδή 3105 sec μετά την έναρξη της θέρμανσης/πρώτης βιντεοσκόπησης. Από αυτό το σημείο και έπειτα αρχίζει ουσιαστικά η σταδιακή ψύξη του heat pipe, καθώς ο ανεμιστήρας συνεχίζει να λειτουργεί.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, μολονότι η παροχή θερμότητας στον πυρήνα έχει σταματήσει, ο ανεμιστήρας βρίσκεται στους 41 βαθμούς κελσίου και οπωσδήποτε επηρεάζει δυσμενώς την απαγωγή θερμότητας από τον γειτνιάζοντα συμπυκνωτή του heat pipe.

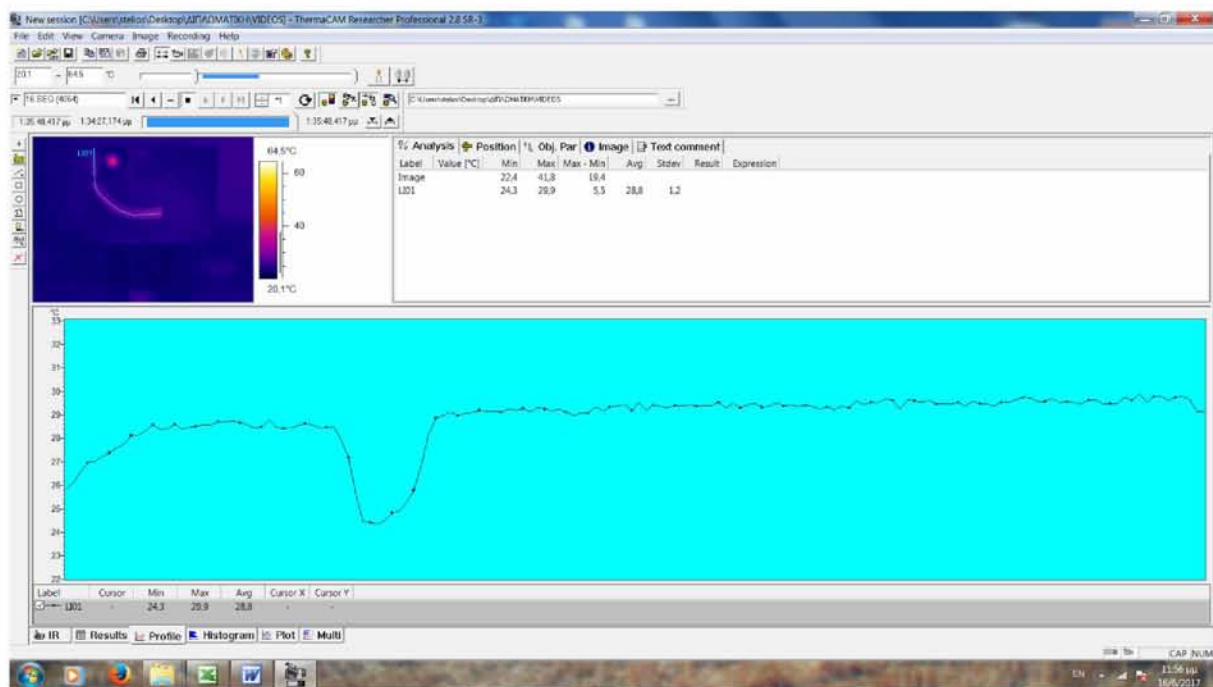


Σχήμα 5.34 στιγμιότυπο στα 3229 sec

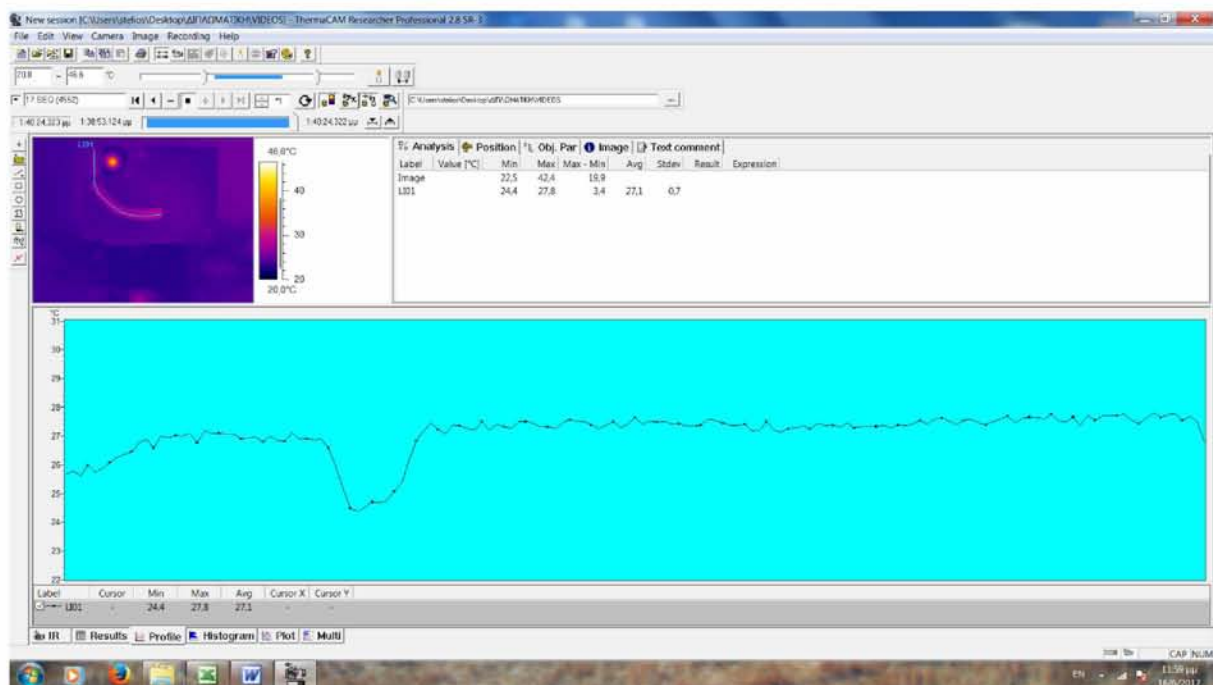
Από το παραπάνω στιγμιότυπο και μέχρι τέλους διακρίνεται η σταδιακή ψύξη του αγωγού, καθώς ο διακόπτης του soldering station έχει τεθεί σε θέση off, ενώ ο ανεμιστήρας συνεχίζει να λειτουργεί.



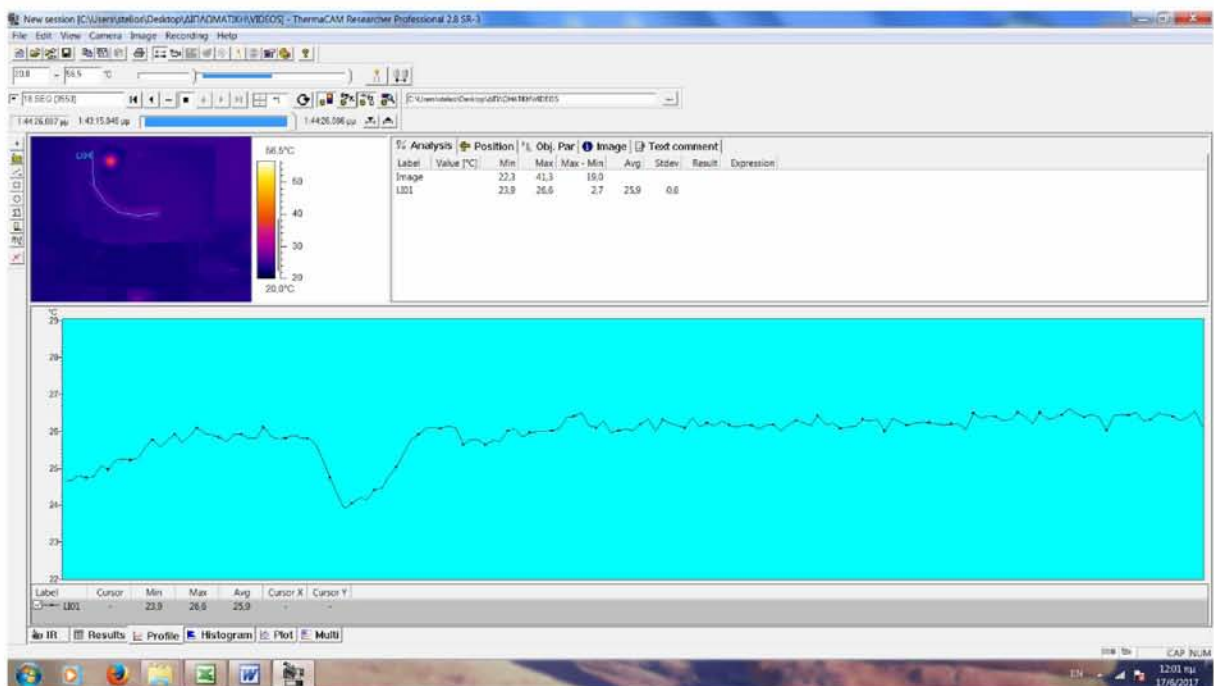
Σχήμα 5.35 στιγμιότυπο στα 3485 sec



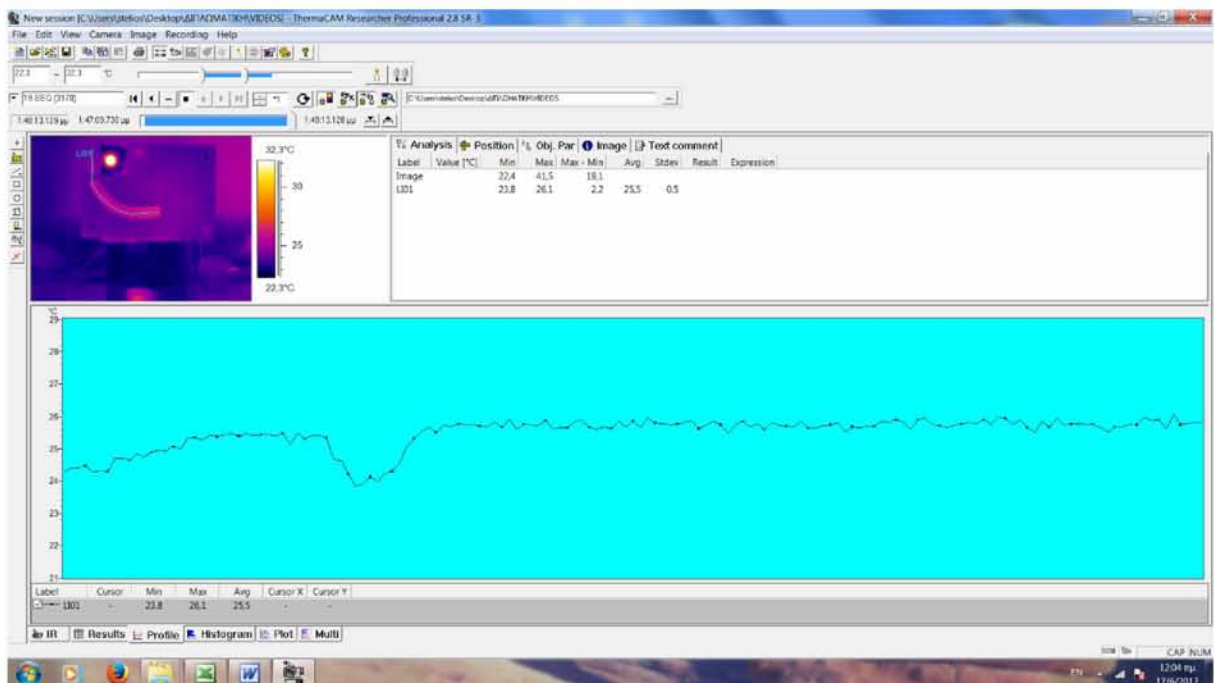
Σχήμα 5.36 στιγμιότυπο στα 3753 sec



Σχήμα 5.37 στιγμιότυπο στα 4029 sec



Σχήμα 5.38 στιγμιότυπο στα 4271 sec

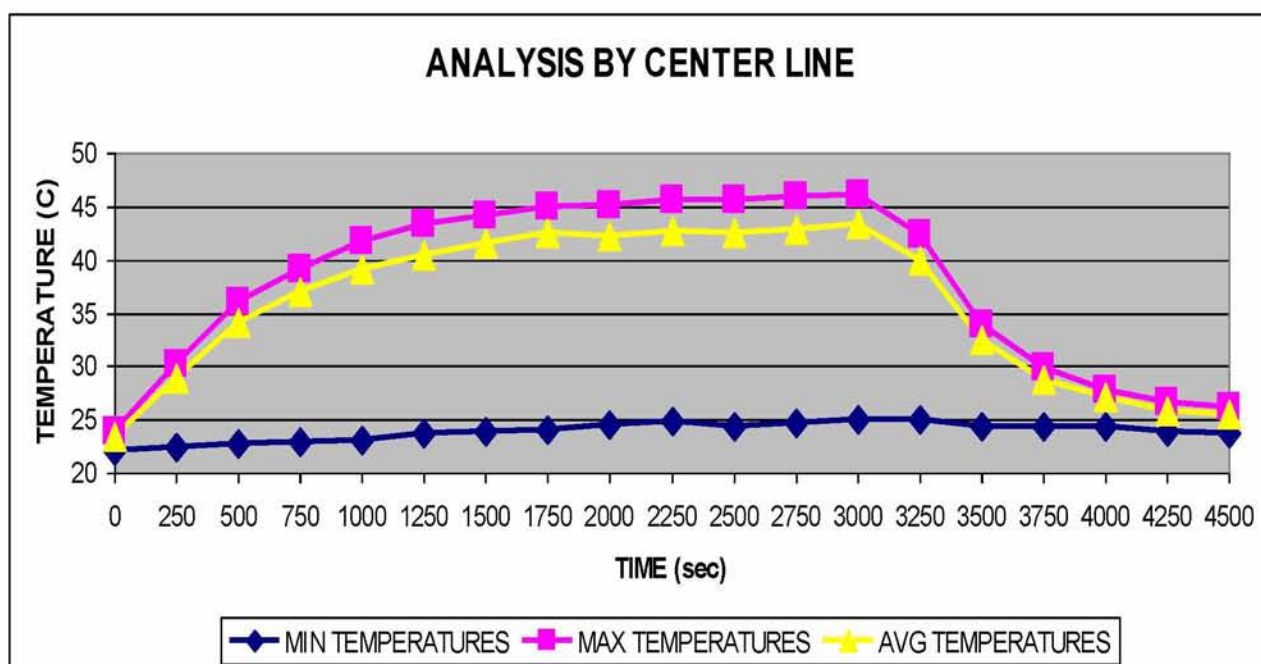


Σχήμα 5.39 στιγμιότυπο στα 4498 sec

Στο παραπάνω στιγμιότυπο φαίνεται πως η θερμοκρασία του αγωγού έχει φτάσει σχεδόν στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Από τα παραπάνω στιγμιότυπα ελήφθησαν οι ακόλουθες μετρήσεις

A/A	sec	Min	Max	Avg
1	87	22,1	23,9	23,4
2	276	22,5	30,2	29
3	459	22,7	36	34,1
4	644	22,9	39,2	37
5	889	23,1	41,8	39,2
6	1131	23,8	43,3	40,4
7	1374	23,9	44,2	41,6
8	1617	24,1	44,9	42,6
9	1859	24,5	45,1	42,2
10	2101	24,9	45,7	42,7
11	2345	24,3	45,7	42,5
12	2611	24,7	45,9	42,8
13	2861	25,1	46,1	43,3
14	3229	25	42,4	40
15	3485	24,4	34	32,5
16	3753	24,3	29,9	28,8
17	4029	24,4	27,8	27,1
18	4271	23,9	26,6	25,9
19	4498	23,8	26,1	25,5



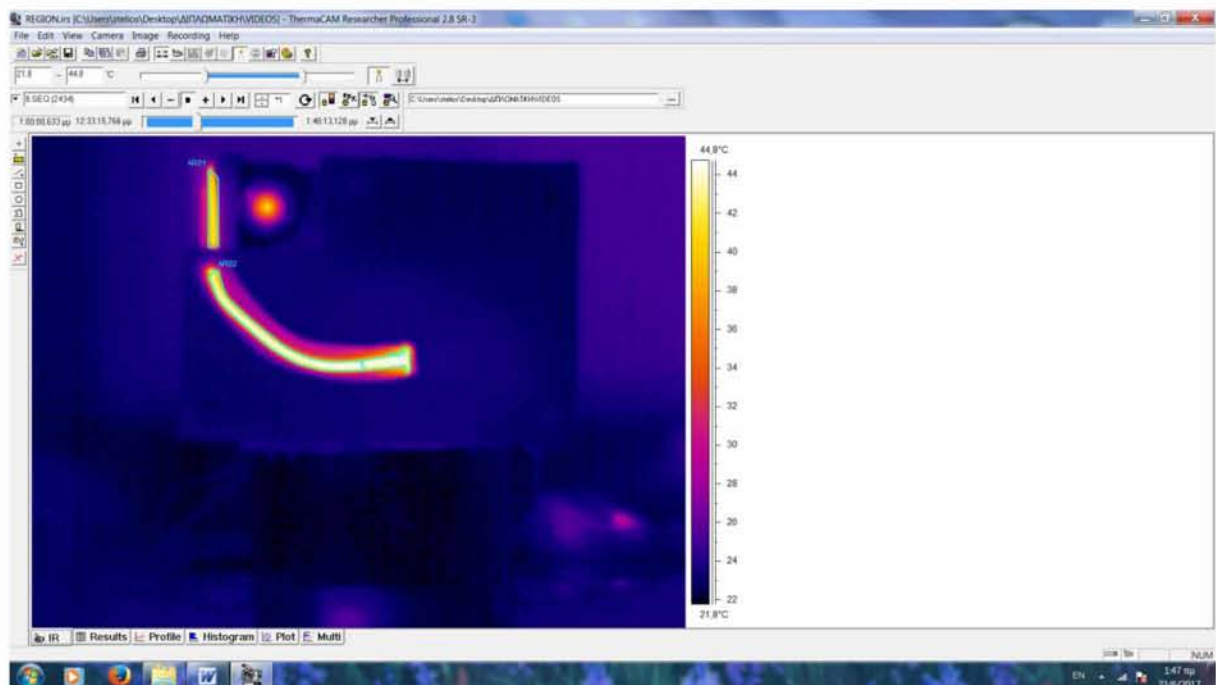
Σχήμα 5.40 Μέγιστη, ελάχιστη και μέση θερμοκρασία κατά μήκος της κεντρικής γραμμής

Όπως φαίνεται ξεκάθαρα στο παραπάνω διάγραμμα οι μέγιστες θερμοκρασίες κατά μήκος του αγωγού έχουν την ίδια μορφή με τις θερμοκρασίες του πυρήνα για τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα ίση με 6V, με μόνη διαφορά ότι η οριακή τιμή τους είναι κατά 6

βαθμούς κελσίου μικρότερη από αυτή του πυρήνα. Οι ελάχιστες τιμές κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του αγωγού δεν προσφέρουν κάποια επιπλέον πληροφορία για τη θερμοκρασία στο περίβλημα του heat pipe, καθώς όλες τους αφορούν στο σημείο στήριξης του ανεμιστήρα.

5.6.2 Ανάλυση με βάση τις περιοχές

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στη παράγραφο 3.5 επιλέχθηκαν 3 περιοχές από το heat pipe, οι AR01, AR02 και AR03 οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις περιοχές του συμπυκνωτή, της αδιαβατικής περιοχής και του εξαερωτήρα αντίστοιχα.

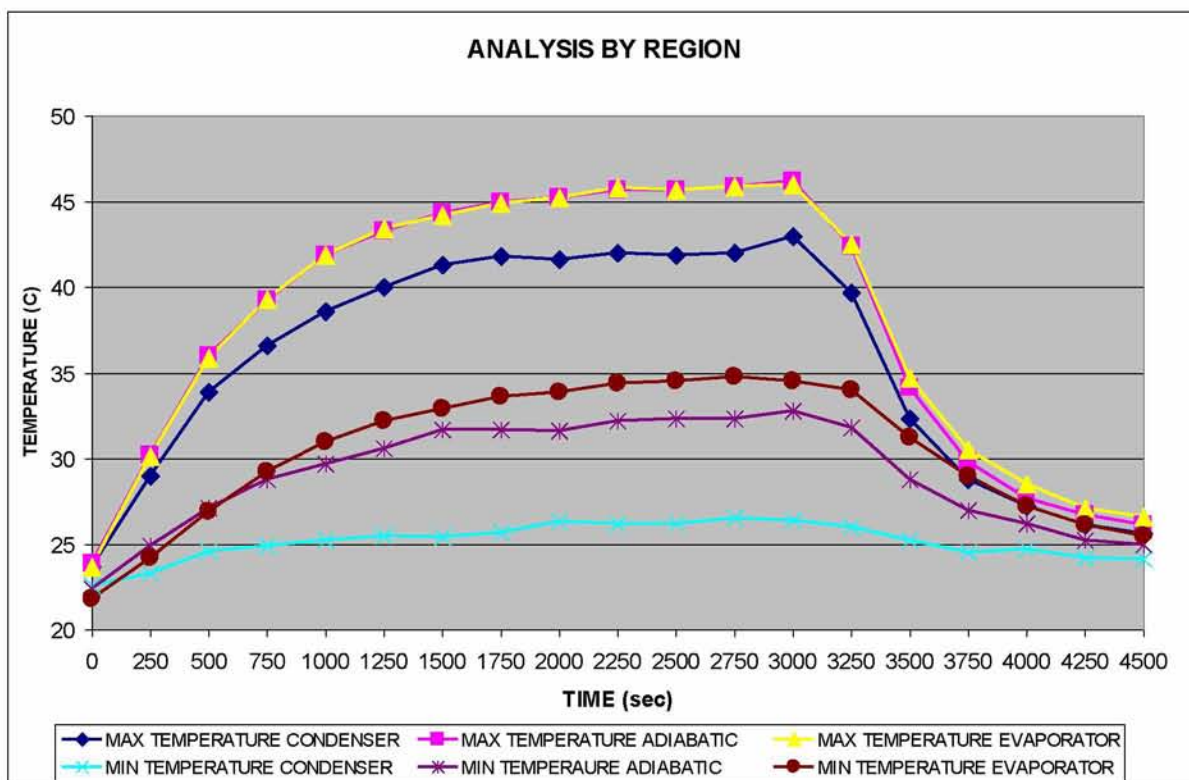


Σχήμα 5.41 Η ανάλυση με βάση τις τρεις περιοχές του heat pipe

Στο τέλος του κάθε βίντεο ελήφθησαν αρχικά οι μέγιστες τιμές και στη συνέχεια οι ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας ανά περιοχή. Στη συνέχεια έγινε απεικόνιση των τιμών αυτών σε κοινό διάγραμμα. Αξίζει να τονιστεί ότι έγινε προσπάθεια έτσι ώστε οι περιοχές αυτές να συμπίπτουν με αυτές που περιγράφονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του heat pipe (βλ. σχήμα 4.5).

MAX TEMPERATURE (C)				
A/A	SEC	CONDENSER	ADIABATIC	EVAPORATOR
1	87	23,7	23,9	23,7
2	276	29	30,2	30,1
3	459	33,9	36	35,9
4	644	36,6	39,2	39,3
5	889	38,6	41,9	41,9
6	1131	40	43,3	43,4
7	1374	41,3	44,3	44,2
8	1617	41,8	45	44,9
9	1859	41,6	45,2	45,2
10	2101	42	45,7	45,8
11	2345	41,9	45,7	45,7
12	2611	42	45,9	45,9
13	2861	43	46,2	46
14	3229	39,7	42,4	42,5
15	3485	32,3	34,1	34,7
16	3753	28,8	29,8	30,5
17	4029	27,2	27,7	28,5
18	4271	26,1	26,7	27,1
19	4498	25,6	26,1	26,6

MIN TEMPERATURE				
A/A	SEC	CONDENSER	ADIABATIC	EVAPORATOR
1	87	22,6	22,4	21,8
2	276	23,3	24,9	24,2
3	459	24,6	27,1	26,9
4	644	24,9	28,8	29,2
5	889	25,2	29,7	31
6	1131	25,5	30,6	32,2
7	1374	25,4	31,7	32,9
8	1617	25,7	31,7	33,6
9	1859	26,3	31,6	33,9
10	2101	26,2	32,2	34,4
11	2345	26,2	32,3	34,5
12	2611	26,5	32,3	34,8
13	2861	26,4	32,8	34,5
14	3229	26	31,8	34
15	3485	25,2	28,8	31,2
16	3753	24,5	27	29
17	4029	24,7	26,2	27,2
18	4271	24,2	25,2	26,1
19	4498	24,1	25	25,5

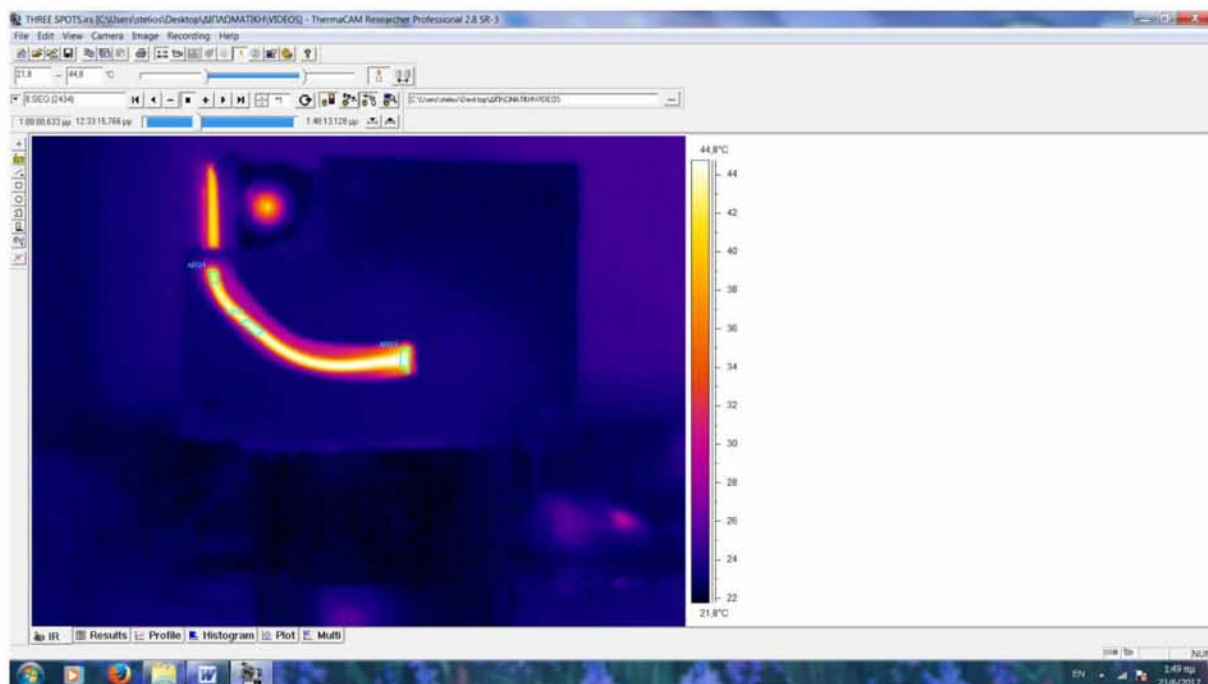


Σχήμα 5.42 Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες στις τρεις περιοχές ανάλυσης

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα δεν διακρίνουμε κάποια σημαντική διαφορά μεταξύ των τιμών της θερμοκρασίας του εξαερωτήρα και του αδιαβατικού τμήματος ως προς τις μέγιστες τιμές, ενώ διακρίνεται ξεκάθαρα η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εξαερωτήρα και του συμπυκνωτή και πιο συγκεκριμένα οι χαμηλότερες θερμοκρασίες στο τμήμα του συμπυκνωτή της τάξης των **3** βαθμών κελσίου. Επιπλέον η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα του heat pipe ανέρχεται στους **16,5** βαθμούς κελσίου.

5.6.3 Ανάλυση με βάση τα σημεία

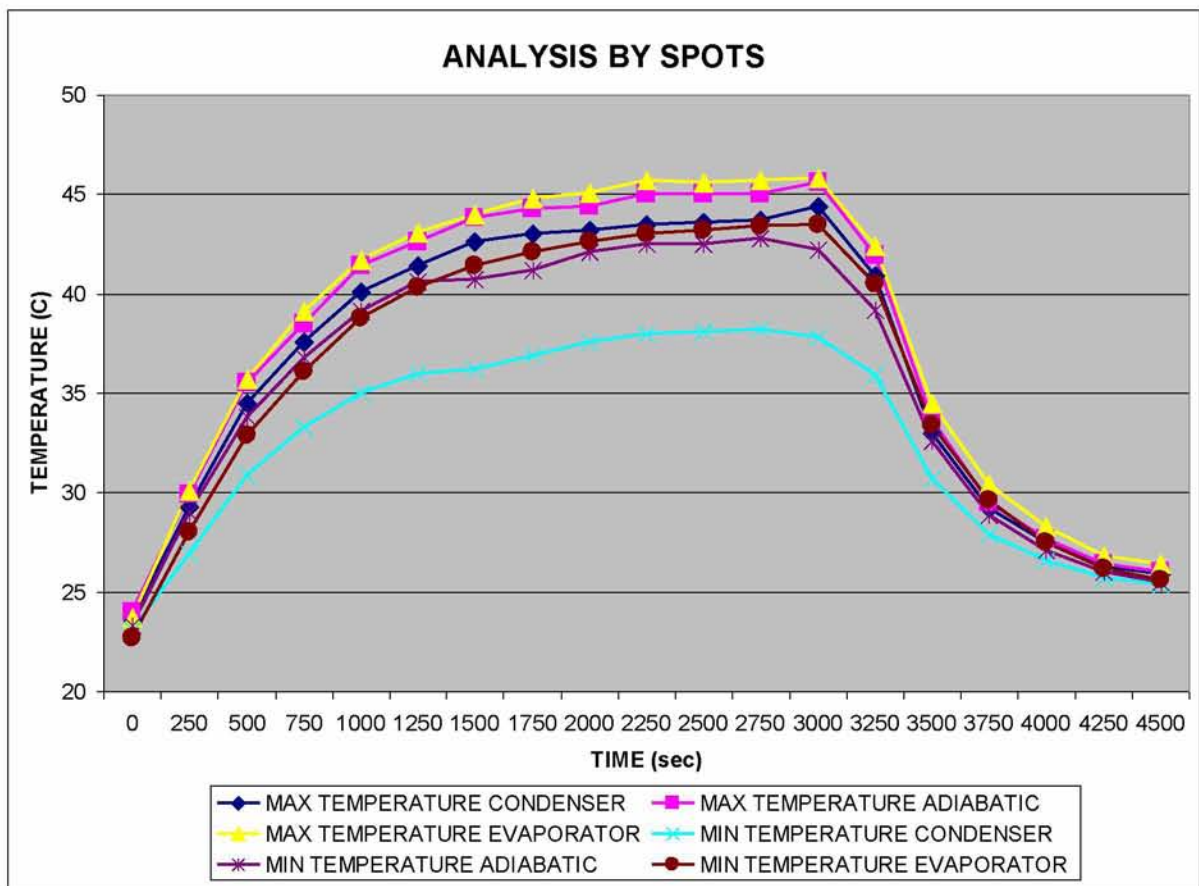
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στη παράγραφο 3.5 επιλέχθηκαν 3 περιοχές από τον αγωγό οι AR01, AR02 και AR03 οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις περιοχές του συμπυκνωτή, της αδιαβατικής περιοχής και του εξαερωτήρα αντίστοιχα. Η μόνη διαφορά με την προηγούμενη ανάλυση είναι ότι αυτές είναι σημαντικά μικρότερες.



Σχήμα 5.43 Η ανάλυση με βάση τα 3 σημεία επί του heat pipe

MAX TEMPERATURE C				
A/A	SEC	CONDENSER	ADIABATIC	EVAPORATOR
1	87	23,6	24	23,7
2	276	29,3	29,9	30,1
3	459	34,5	35,5	35,7
4	644	37,6	38,5	39,1
5	889	40,1	41,4	41,7
6	1131	41,4	42,6	43,1
7	1374	42,6	43,8	44
8	1617	43	44,3	44,8
9	1859	43,2	44,4	45,1
10	2101	43,5	45	45,7
11	2345	43,6	45	45,6
12	2611	43,7	45	45,7
13	2861	44,4	45,6	45,8
14	3229	40,9	41,9	42,4
15	3485	33	33,7	34,5
16	3753	29,2	29,5	30,4
17	4029	27,5	27,7	28,3
18	4271	26,3	26,4	26,8
19	4498	25,9	26	26,4

MIN TEMPERATURE C				
A/A	SEC	CONDENSER	ADIABATIC	EVAPORATOR
1	87	23,1	23,3	22,7
2	276	26,9	29	28
3	459	30,9	33,8	32,9
4	644	33,3	36,8	36,1
5	889	35	39,1	38,8
6	1131	36	40,6	40,3
7	1374	36,2	40,7	41,4
8	1617	36,9	41,2	42,1
9	1859	37,6	42,1	42,6
10	2101	38	42,5	43
11	2345	38,1	42,5	43,2
12	2611	38,2	42,8	43,4
13	2861	37,8	42,2	43,5
14	3229	35,9	39,2	40,5
15	3485	30,7	32,6	33,4
16	3753	27,9	28,9	29,6
17	4029	26,6	27,1	27,5
18	4271	25,7	26	26,2
19	4498	25,4	25,5	25,6



Σχήμα 5.44 Μέγιστες και ελάχιστες τιμές στα τρία σημεία ανάλυσης

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα δεν διακρίνουμε κάποια σημαντική διαφορά μεταξύ των τιμών της θερμοκρασίας του εξαερωτήρα και του αδιαβατικού τμήματος ως προς τις μέγιστες τιμές, ενώ διακρίνεται ξεκάθαρα η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εξαερωτήρα και του συμπυκνωτή και πιο συγκεκριμένα οι χαμηλότερες θερμοκρασίες στο τμήμα του συμπυκνωτή της τάξης των **2** βαθμών κελσίου. Επιπλέον η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα του heat pipe ανέρχεται στους **6,5** βαθμούς κελσίου. Εάν συγκρίνουμε αυτές τις διαφορές σε σχέση με αυτές της προηγούμενης ανάλυσης, βλέπουμε ότι η μέγιστη διαφορά στα άκρα του heat pipe κατά τη θέρμανση και όταν αυτό βρίσκεται σε μόνιμο φαινόμενο, είναι τουλάχιστον 6,5 βαθμοί κελσίου.

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα-Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

- Η θερμοκρασία στον πυρήνα από χαλκό διατηρήθηκε σχεδόν σταθερή κατά τις μεταβολές στην τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα, εκτός από την περίπτωση των 1,5 V όπου η θερμοκρασία ανέβηκε περίπου 3 βαθμούς Κελσίου κατά μέσο όρο. Αυτό οφείλεται στο μικρό ρυθμό απαγωγής θερμότητας στην έξοδο εξαιτίας της μειωμένης απόδοσης του ανεμιστήρα που είχε σαν συνέπεια τη συσσώρευση θερμότητας στον πυρήνα.
- Οι θερμοκρασίες του αέρα στην έξοδο από τη συσκευή εμφανίζουν σχεδόν σταθερό προφίλ και χαμηλή μέση τιμή κατά τις περιπτώσεις όπου η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα ήταν 6V και 4,5V, ενώ κατά τις περιπτώσεις όπου η τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα ήταν 3V και 1,5V το προφίλ θερμοκρασιών έδειχνε έντονη διακύμανση και σαφώς υψηλότερη μέση τιμή.
- Ο ρυθμός απαγωγής θερμότητας από το σύστημα μέσω του ανεμιστήρα έδειξε να συμβαδίζει με την τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα.
- Το IR θερμόμετρο μας έδειξε μια τελείως διαφορετική εικόνα σε σχέση με τη θερμική κάμερα και πιο συγκεκριμένα μας έδειχνε, σε τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα ίση με 6V, το τμήμα του συμπυκνωτή μέχρι και 12 βαθμούς Κελσίου παραπάνω από το τμήμα του εξαερωτήρα, γεγονός το οποίο δεν επαληθεύτηκε επ' ουδενί με τη θερμική κάμερα.

- Η μελέτη των βίντεο της θερμικής κάμερας, έδειξε ότι ο εξεραωτήρας βρίσκεται πάντα σε υψηλότερη θερμοκρασία από το αδιαβατικό τμήμα και αυτό με τη σειρά του βρίσκεται πάντα σε υψηλότερη θερμοκρασία από το συμπτυκνωτή του αγωγού τόσο κατά το μεταβατικό όσο και κατά το μόνιμο φαινόμενο.
- Η κατανομή των θερμοκρασιών κατά μήκος του αγωγού δεν εμφανίζει απότομες μεταβολές αλλά μια σχεδόν γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας καθώς κινούμαστε από το συμπτυκνωτή προς τον εξεραωτήρα. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα του αγωγού είναι σε κάθε περίπτωση τουλάχιστον 3 βαθμοί κελσίου.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε για την εκπόνηση της παρούσης διπλωματικής εργασίας, υπάρχει η δυνατότητα έρευνας πολλών ακόμη φαινομένων και πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που θα μπορούσαν ακόμη να χρησιμοποιηθούν είναι:

- **Ο προσανατολισμός της συσκευής**, όταν ο συμπτυκνωτής βρίσκεται πάνω από τον εξεραωτήρα στο βαρυτικό πεδίο, τότε το σύστημα είναι gravity assist όπως ακριβώς στη δική μας περίπτωση. Ποια η ανταπόκριση του συστήματος σε διαφορετικό προσανατολισμό;
- **Η ισχύς εισόδου στο σύστημα**, η οποία ήταν 40 Watt και δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα στεγνώματος του φυτιλιού εσωτερικά του αγωγού. Ποια η ανταπόκριση του συστήματος σε μεγαλύτερη ισχύ;
- **Μοναδική είσοδος θερμότητας**. Ποια η ανταπόκριση του συστήματος σε περισσότερες από μια εισόδους θερμότητας;

- **Περιβαντολογικές συνθήκες.** Ποια η ανταπόκριση του συστήματος κατά το start up, σε συνθήκες δημιουργίας πάγου εντός του αγωγού;

Βιβλιογραφία

- [1] Yunus A. Cengel, (2005) “Heat Transfer, A Practical Approach”
- [2] Yunus A. Cengel and Michael A. Boles (1998) “Thermodynamics, An Engineering Approach”.
- [3] Robert S. Brodkey and Harry C. Hershey (2001) “Transport Phenomena, R.S. Brodkey-H.C. Hershey”.
- [4] Ερρίκος Σταπουντζής, (2004) “Σημειώσεις Συμπεστής και Ασυμπίεστης Αεροδυναμικής”, *Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας*.
- [5] S.W. Chi (1976) “Heat Pipe Theory And Practice”, Washington DC: Hemisphere.
- [6] R.S. Gaugler (1944) “Heat Transfer Devices”, US Patend 2350348.
- [7] G.M. Grover, T.P. Cotter and G.F. Erickson (1964) “Structures Of Very High Thermal Conductivity”, *journal of Applied Physics* 35 pp.1190-91.
- [8] A. Faghri (1995) “Heat Pipe Science And Technology”, Taylor And Francis Group, New York, London.
- [9] Peterson, G.P., 1994 “An Introduction to Heat Pipes” John Wiley & Sons Inc, Canada.
- [10] Robert Finn (1999) “Capillary Surface Interfaces” *Notices of the AMS* Volume 46, Number 7.
- [11] P. Dunn & D. A. Reay 1982 “Heat Pipes Third Edition” Pergamon Press.